

第一章 前言

1.1 研究緣起

在工作場所實施粉塵採樣的目的，是為了能夠準確的測出侵入人體呼吸系統各部位的特定粒徑範圍的粉塵暴露濃度，並了解工作環境中的粉塵濃度是否合乎法規所訂定的恕限值。目前 ACGIH、ISO 及 CEN 提出了三種採樣基準(Hinds,1999, pp.245-255)作為新的國際標準，包含進入頭部空氣通道的粉塵稱為可吸入性粉塵 (Inhalable mass)，穿過頭部空氣到進入支氣管的粉塵稱為胸腔區粉塵 (Thoracic mass)、及達到氣體交換區的粉塵稱為可呼吸性粉塵 (Respirable mass)，後兩者的穿透率曲線的截取氣動直徑分別為 10 μm 及 4 μm 。此規範對採樣器的穿透率曲線定義如下：

(1) 可吸入性粉塵：

$$EI(d_{pa}) = 0.5[1 + \exp(-0.06d_{pa})] \times 100\% \quad , \quad 0 < d_{pa} \leq 100 \mu\text{m}$$

(2) 胸腔區粉塵：

$$ET(d_{pa}) = EI(d_{pa}) \left[1 - F\left(\frac{\ln(d_{pa}/11.64)}{\ln 1.5}\right) \right]$$

(3) 可呼吸性粉塵：

$$ER(d_{pa}) = EI(d_{pa}) \left[1 - F \left(\frac{\ln(d_{pa} / 4.25)}{\ln 1.5} \right) \right]$$

其中 $F(x)$ 為正規分佈累積函數。

目前市售的粉塵分徑採樣器，大都只是針對以上三種粉塵做個別的分徑採樣，除了 TSI 的 Respicon 採樣器 (Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN) 外，鮮少有針對上述三種粉塵同時做分徑採樣的採樣器。

以可吸入性粉塵採樣器而言，目前市面上有許多不同的設計，最常用為 IOM(Institute of Occupational Medicine)採樣器(Mark and Vincient, 1986)。過去針對 IOM 及其他不同的可吸入性粉塵分徑採樣器的性能評估，可參考 Hinds(1999, pp.248-249)之說明。

不同的胸腔區的粉塵分徑採樣器則於 Baron and John (1999)之文章中作回顧。在美國，與胸腔區粉塵採樣規範最接近者為 PM_{10} 採樣規範(Hinds, 1999, p.255)，但其採樣效率曲線較胸腔區粉塵效率規範陡峭。

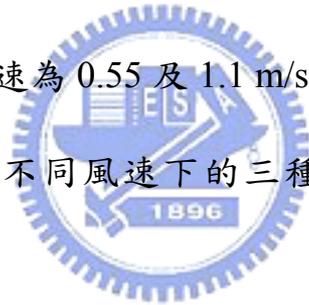
在可呼吸性粉塵分徑採樣器方面，有許多的前置收集器是旋風器的設計，如在美國最常用的是 10mm 尼龍旋風器。也有利用海棉作為前置收集器的可呼吸性粉塵分徑採樣器 (賴全裕等人, 民國 86 年)。

蔡等人 (1994)針對市售的可呼吸個人粉塵採樣器10mm尼龍旋風器及SKC旋風器進行效能評估研究，訂出這兩個採樣器的操作條件，以符合新的ACGIH規範，並探討採樣泵之脈動，微粒種類，及採樣器的方位對收集效率的影響。蔡等人 (1997)針對10 mm 尼龍旋風器之微粒收集效率易受粉塵負荷及粉塵靜電之影響，而設計出一新型IOSH旋風器，以解決粉塵負荷及粉塵靜電的問題。新型旋風器以導電的鋁合金製作,並加大內徑尺寸及出口管長以降低微粒累積於內壁的厚度，減少微粒負荷對收集效率的影響。實驗結果顯示，新型IOSH旋風器的微粒收集效率幾已不受粉塵靜電之影響，而其截取氣動直徑因粉塵負荷所造成的變化遠較10 mm尼龍旋風器減少很多。新型IOSH旋風器採樣流量在1.7 L/min 時，其收集效率曲線能符合新ACGIH 規範。

賴等人(1997), Chen et al. (1998)利用多孔性介質（海綿），作為呼吸性粉塵採樣器的前置收集器，他們改變海綿採樣的表面風速、厚度、填充密度、孔隙度，或將不同厚度、孔隙度的海綿串聯，結果發現僅能達到國際新定義曲線截取氣動直徑的要求，而其斜率仍無法與新定義曲線一致。然而利用並聯兩組不同管徑之採樣管，且分別放入孔隙度 100、10 ppi，厚度 20、20 mm，直徑 25、13 mm 之海綿，在採樣流量 10.1 L/min 進行採樣時，他們發現可幾乎完全符合可呼吸性

粉塵的新分徑曲線。因此，多孔介質對於呼吸性粉塵的收集是可行的。

目前市面僅有的同時作三種粉塵的採樣器為 TSI 的 Respicon 採樣器 (Model 8522, TSI Inc., St. Paul, MN) (Li et al., 2000), 如圖 2 所示。它是利用一個圓環孔型的進口(annular slot)以達到可吸入性粉塵採樣的目的，然後再利用二個虛擬衝擊器作胸腔區及可呼吸性粉塵的採樣。Witschger et al. (1997) 也曾研究過一個可以作可吸入性粉塵採樣的圓環孔型進口。根據 Li et al. (2000) 的研究報告，Respicon 的對可吸入性粉塵的準確度高於其他的採樣器，如 IOM 採樣器，且對於風速為 0.55 及 1.1 m/s 的風向不敏感。圖 3 為 TSI Respicon 採樣器在不同風速下的三種粉塵的採樣效率(Li et al., 2000)。



另外，工作場所可呼吸性粉塵的濃度也可先利用多階衝擊器。如 Marple 個人多階衝擊器(Marple Personal Impactor, Rubow et al., 1987)求取粉塵粒徑分佈後，再利用不同的採樣效率規範求得三種不同的粉塵濃度。關於 Marple 個人多階衝擊器之各階收集效率與粒徑之關係，入口採樣效率、在衝擊板上塗油對固體微粒反彈程度之影響，及微粒在各階間的內壁損失等問題曾由 Rubow et al. (1987) 利用實驗室產生單徑的 polystyrene

latex(PSL)、oleic acid 及 ammonium fluorescein 等微粒來加以研究。在國內的學者蔡(民國 93 年)也擬開發改良式的 Marple 多階個人採樣器，稱為 mMarple，作為工作場所特定種類粉塵的採樣器。

在國內，多孔金屬片曾被採用作為慣性衝擊器的採樣介質 (Tsai et al. 2001)。Tsai et al. (2001) 設計一個具有二階慣性衝擊器的個人固氣分離採樣器，實驗結果顯示：二階慣性衝擊器的截取氣動直徑分別為 9.5 和 2.0 μm 。由研究結果可知，以多孔金屬材質作為衝擊板時，由於多孔金屬片的毛細作用可容納較多的微粒量，並且無微粒過負荷的問題。但是，由於氣流會貫穿進入多孔金屬材質內部，造成微粒收集效率曲線和傳統理論預測曲線不同。此時，以多孔金屬材質作為收集板的微粒收集效率高於平面型衝擊板。當以多孔金屬片取代傳統的平板型衝擊板作為慣性衝擊器的採樣介質，因為細小微粒（小於截取氣動直徑的微粒）的過剩收集作用，前者的微粒收集效率曲線圖形顯得較為平緩，截取氣動直徑值 (cut size) 亦會較小。

由於多孔介質的收集效率曲線比較平緩(Chen et al., 1998; Tsai et al., 2001)，且可使用慣性衝擊器作成體積較小的個人多階衝擊器，因此本研究使用多孔介質作為收集板，設計一個三階的粉塵分徑採樣器。

1.2 研究目的

本研究之目的有以下幾點:

- (1) 設計並製造一組三階粒狀污染物粉塵採樣器。
- (2) 評估本採樣器對工作場所粉塵的收集效率。
- (3) 尋求本採樣器之粉塵收集效率可以符合可呼吸性曲線及胸腔區曲線。

設計本採樣器最佳的尺寸、最合適的操作流量及最佳孔隙度之泡棉收集板，替本採樣器找出可以符合胸腔區曲線及可呼吸性曲線之粉塵收集效率。



第二章 文獻回顧

以下針對多孔介質作成的採樣器，以及性能評估之方法作一文獻回顧，以作為本研究的參考依據。

2.1 多孔介質衝擊板

Kavouras and Koutrakis (2001) 利用聚氨酯泡棉 (PUF) 取代傳統 PM2.5 Harvard 慣性衝擊器的收集介質。探討以聚氨酯泡棉作為慣性衝擊器的收集介質時的微粒收集曲線特徵，改變參數包括 PUF 的密度，雷諾數，收集介質直徑，和噴嘴至收集板距離。結果顯示使用 PUF 作為收集介質時會導致收集效率曲線的重要改變，如：50 % 的截取氣動直徑從 2.48 μm 降低至 1.12 μm ，對應的 $\sqrt{St_{50}}$ 為 0.24。雖然傳統慣性衝擊器的設計理論可以正確預測平面型收集介質的 50 % 截取氣動直徑，但是對於 PUF 收集介質而言，此一理論會高估 50 % 截取氣動直徑的實驗值。由於微粒在碰撞 PUF 後，比起平面型衝擊板而言，較大部分的過剩動能會被 PUF 收集介質吸收，因此可降低微粒彈跳及再揚起的量。如圖 4 所示雷諾數改變時，使用 PUF 和塗油的多孔金屬收集板的收集效率曲線不同，其原因為不同的流線所致，PUF 的收集效率曲線比多孔金屬介質平緩，較適合作個人粉塵分徑採樣之用

Sioutas et al. (1999) 嘗試設計 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的個人慣性衝擊器來抑止微粒的反彈。結果如圖 5 所示，一開始以不塗敷任何黏著劑的單純鋁材凹槽為收集板時，微粒反彈的現象並沒有明顯的被抑止，特別是對於截取氣動直徑以上的微粒，收集效率會有明顯的下降。當使用多孔金屬板當收集板時，可以達到提高收集效率及降低微粒損失的目的。以浸漬過黏著劑的多孔金屬片為採樣介質，由於多孔金屬片的孔隙過濾結構及黏著劑的吸附效果，可以有效收集大於截取氣動直徑以上的微粒，避免微粒反彈及再揚起的現象。

Heikkinen et al. (2000) 探討不同厚度 (thickness) 及不同孔隙度的多孔金屬片對於固體微粒的吸附貫穿特性。結果顯示，在長時間的採樣環境下，擁有孔隙結構的多孔金屬片會因為採集到大量微粒，造成微粒的累積堵塞孔洞而降低流體的穿透性，發生採樣收集效率降低的現象。採樣器上下游端壓力降的變化可以當作多孔金屬片是否要繼續使用或是更新的一個依據。另外，Marjamaki et al. (2003) 探討不同孔隙度及表面粗糙度的多孔金屬片作為慣性衝擊器的收集介質時的微粒收集曲線特徵。結果顯示，慣性衝擊器的收集效率決定於多孔金屬片的孔隙特性及表面粗糙度，形成多孔金屬片特有的毛細吸附作用而增加微粒的收集效率；而多孔金屬片表面粗糙度對於微粒收集效率的影響又大於多孔金屬片的孔隙結構特性，是影響收集效率的主要因

子。當以多孔金屬片取代傳統的平板型衝擊板作為慣性衝擊器的採樣介質，因為細小微粒（小於截取氣動直徑的微粒）的過剩收集作用，前者的微粒收集效率曲線圖形顯得較為平緩，截取氣動直徑值 (cut size) 亦會較小。

由以上文獻回顧可知，以多孔介質作為慣性衝擊器的採樣介質時，有改善固體微粒在慣性衝擊器中的反彈損失的問題、具較高的收集容量和泡綿採樣介質的不需塗敷等優點。

本研究擬使用多孔介質(如泡綿、多孔金屬板)作為三階個人粉塵分徑衝擊器之設計，除了上述設計之優點外，最主要是利用其收集效率曲線較平版型的收集板平緩，較能符合工作場所粉塵分徑採樣效率之規範的特性，希望能同時採到三種不同粉塵之濃度。

2.2 採樣器之性能評估

賴等人(2000)及 Chen et al.(1999)曾探討文獻中對於採樣器性能的規範，如美國工業衛生師協會(ACGIH, 1984)規定的採樣器之效率曲線與理想效率曲線在每個粒徑之誤差必需在 15%以內；採樣器的累積效率曲線與氣動直徑之關係，在對數機率圖上必須呈直線關係，且期判定係數(R-square)值必須大於 0.9；再者截取直徑的 95%信賴區間亦須落在截取直徑之 $\pm 10\%$ 之內。

若是考量採樣器的採樣質量和精確度，則 NIOSH 規定 95%之樣本質量誤差必須在真實的 $\pm 25\%$ 以內，而此項規定的相對標準偏差 (RSD, relative standard deviation) 為 0.128(Liden et al., 1992)。

賴等人(2000)及 Chen et al.(1999)利用 Barthey and Breuer 的方法，計算採樣器效率曲線的截取直徑及斜率，並發現海綿採樣器比旋風器之分徑效率佳。除了採樣器之準確度外，為了兼顧採樣器之間的變異量或精確度，賴等人(2000)及 Chen et al.(1999)建議使用均方根誤差(MSE, Mean Square Error)作為評估之基準。

根據以上的文獻，本研究所設計之採樣器其效率曲線與理想曲線在每個粒徑之誤差必須在 15%之內，並以 MSE 作為評估採樣器的指標，其中精確度以採樣器的重覆實驗數據計算而得。

第三章 研究方法

3.1 採樣器設計

本研究所設計採樣器示意圖如圖 6 所示，本採樣器之可吸入性入口為採樣器的第一階，依文獻而作設計，入口後面有一個#1 多孔介質基板(substrate #1)，第二階為截取氣動直徑 10 μ m 的慣性衝擊器，後端接#2 多孔介質基板(substrate #2)，第三階為截取氣動直徑 4 μ m 的慣性衝擊器，後端接#3 多孔介質基板(substrate #3)，最後一階為一個終端濾紙(substrate #4)，substrate #4 所採之粉塵為可呼吸性粉塵 RM，substrate#4 加上 substrate#3，為胸腔區粉塵(TM)，substrate #1 至#4 之和為可吸入性粉塵(IM)。本採樣器之流量設計在 2-5Lpm 之間。

本研究擬設計並製造此個人採樣器，並完成不同多孔衝擊板，不同流量，不同微粒粒徑於 10 μ m，及 4 μ m 兩階衝擊器之實驗室測試工作，找出符合 ISO 及 ACGIH 效率規範之最佳採樣設計及操作流量。

本採樣器的可吸入性入口根據 Witschger et al. (1997) 的經驗公式來採計，其示意圖如圖 7 所示，以符合 ACGIH 訂定的吸入性粉塵貫穿曲線。其吸入效率 (EI) 可計算如下：

$$EI = \frac{1}{1 + 2Stk_w^{k_1} \cdot R^{k_2}} \left[1 + Stk_w^{k_3} \left(\frac{R \cdot (D_s / h)}{k_5} \right)^{k_4} \right]$$

$$\text{其中 } St = \frac{\rho_p d_p^2 U_w C}{9\mu D_s}$$

$$R = \frac{U_w}{U_s}$$

其中， ρ_p 為微粒密度， d_p 為微粒直徑， U_w 為外界風速， U_s 為入口吸入速度， C 為滑動校正因子， μ 為氣體黏滯係數， D_s 為圓形蓋帽直徑， h 為圓形蓋帽至採樣器本體距離。與可吸入性粉塵的採樣效率規範比較可知，本圓環孔入口的效率十分接近，如圖8所示。

本研究所設計之採樣器其效率曲線與理想曲線在每個粒徑之誤差必須在15%之內，並以MSE作為評估採樣器的指標，其中精確度以採樣器的重覆實驗數據計算而得。



3.2 實驗方法

本研究與一般慣性衝擊器不同處是使用多孔材質取代一般的收集板，進行液體(如油酸)及固體微粒(如 AF Ammonium Fluorescein, NaCl, KCl)實驗測試。

圖 9 及圖 10 為本研究的兩個實驗系統。前者可以測定微粒在衝擊器之收集效率及微粒在衝擊器內的損失率，後者則只能測得衝擊器的收集效率，用以測得微粒之損失率。在圖 9 的系統中 2~15 μm 的單徑液體及固體微粒是使用振動流孔板單徑氣膠產生器 (VOMAG,

Vibrating Orifice Monodisperse Aerosol Generator, TSI Model 3450, TSI INC. St. Paul, Minn.) 產生，再經乾燥及使用靜電中和器 (Kr85 Neutralizer) 去除靜電後，進入待測試的衝擊器內部進行收集。本實驗所使用的液體微粒為添加螢光黃 (Fluorescein, $C_{20}H_{12}O_5$) 的油酸 (Oleic Acid) 溶液，固體微粒為 Ammonium-Fluorescein ($C_{20}H_{11}NH_4O_5$)。

欲產生不同粒徑之微粒，必須選擇不同的振動流孔板 (Orifice) 並調整適當的振動頻率及推進器 (Syringe Pump) 的推進速率，以產生良好單徑度的微粒。由振動流孔板所噴出的均勻液滴，與適當的分散空氣 (Dispersion Air) 及稀釋空氣 (Dilution Air) 混合後，經充分的乾燥及靜電的去除，以獲得實驗所需的單徑微粒，而微粒的單徑度則透過 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Model 3310A) 確認。

測定衝擊器之微粒收集效率及損失率時，使用螢光儀 (Fluorometer, Turner 10-AU, Cincinnati U.S.A.) 為之。衝擊器下游端的濾紙 (After Filter) 分別以夾子夾入萃取溶液中進行萃取，噴嘴下方 (Nozzle (outer)) 及衝擊器本身的內壁 (Wall)，則利用棉花棒沾取萃取液後進行擦拭，再洗入萃取液中 (萃取液的體積視採樣時間及採樣時的濃度而定)。將裝有萃取液各個樣品瓶置入超音波震盪器中震盪 10 分鐘 (若震盪後發現尚未均勻溶解，則持續震盪至完全溶解)，之後以螢光儀偵測其濃度，再轉換成微粒的質量後即可計算衝擊器的微粒損失量。

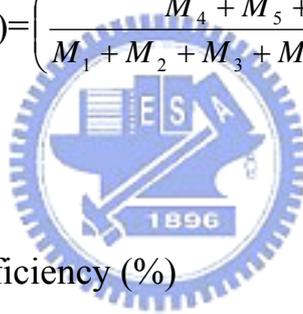
本採樣器粉塵穿透效率計算方式如下：

Inspirable stage Penetration efficiency (%)

$$\text{Penetration Efficiency (\%)} = \left(\frac{M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7} \right) \times 100\%$$

10 μm stage Penetration efficiency (%)

$$\text{Penetration Efficiency (\%)} = \left(\frac{M_4 + M_5 + M_6 + M_7}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7} \right) \times 100\%$$



4 μm stage Penetration efficiency (%)

$$\text{Penetration Efficiency (\%)} = \left(\frac{M_7}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7} \right) \times 100\%$$

本採樣器內部微粒損失率之計算方式：

4 μm nozzle plate Particle Loss (%)

$$\text{Loss (\%)} = \left(\frac{M_4}{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7} \right) \times 100\%$$

M_1 =Inlet Stage (μg)

M_2 =Back side 10 μm nozzle plate (μg)

M_3 =10 μm stage (μg)

M_4 =4 μm nozzle plate (μg)

M_5 =Back side 4 μm nozzle plate (μg)

M_6 =4 μm stage (μg)

M_7 =Filter (μg)

若是微粒在衝擊器內的損失率低時，可以利用如圖 10 所示的系統進行衝擊器的微粒收集效率評估。0.5~15 μm 的粒徑範圍則利用 Constant Output Atomizer (TSI Model 3076)及超音波霧化器(ultrasonic nozzle, Model 8700, Sono-Tek Inc., NY, USA)將油酸溶液 (Oleic Acid, 體積濃度 2.7%或 5%, 溶劑為純度 95%之乙醇), NaCl, KCl等溶液霧化產生多徑微粒。因 Constant Output Atomizer 可產生大量微粒，其微粒濃度與粒徑分佈有一定的穩定度，適合實驗上的量測，當進流壓力調至 35 psi時，產生氣流量為 3.5 lpm，之後測量慣性衝擊器的上下游微粒濃度。測試單階慣性衝擊器的入口濃度 N_1 ($\#/\text{cm}^3$) 時，是將系統二 (圖 10) 中之衝擊器，直接由 APS 測量進口濃度。為減少誤差，在每次微粒收集效率之實驗前後各量三次 N_1 值，並求其平均，若實驗前後之 N_1 值相差在 5% 之內，表示進口濃度 N_1 穩定，可進行實驗，出口濃度 N_2 ($\#/\text{cm}^3$) 則由 APS 連續量測經過衝擊器之微粒濃度，每 20 秒電腦軟體會記錄 N_2 值一次，實驗結束後，再配合進口濃度 N_1 值，計算收集效率。微粒收集效率計算方式如下：

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \times 100 \quad (3)$$

其中 N_1 ：進口端微粒濃度 ($\#/cm^3$)； N_2 ：出口端微粒濃度 ($\#/cm^3$)。

為避免溫度、壓力及預防管路漏氣影響流量正確性，於每次實驗前均以泡沫流量計 (Gilibrator, Gilian Instrument Corp.) 檢驗 APS 及採樣器之流量。

VOMAG 使用的溶液配置

產生單徑固體 Ammonia-Fluorescein 微粒時，先配製 1% Ammonia-Fluorescein 溶液，再用此溶液以稀釋的方式，配製出所需的濃度。1% Ammonia-Fluorescein 溶液配法：1 升量瓶中置入 800 ml 去離子水，加入 0.35 ml 25% 的氨水，左右搖晃使其均勻混合後，加入 12.85 克的 $C_{20}H_{12}O_5$ ，再加入去離子水至量瓶刻度線，置於超音波震盪器中震盪，使 $C_{20}H_{12}O_5$ 溶解為止。

產生液體微粒時是以含有 0.4g/l 螢光劑的油酸溶液來產生，其配製方法如下：1 升的量瓶中置入 500 ml 的酒精，將 0.4 克的 $C_{20}H_{12}O_5$ 加入量瓶中，再加入酒精至量瓶刻度線，置於超音波震盪器中震盪 30 分鐘，使 $C_{20}H_{12}O_5$ 溶解為止。剛震盪完的溶液體積刻度會微微的上升，必須等到溶液刻度降到初始的位置，然後再以此溶液加入適當量的油酸，以配成所需的油酸溶液。

液體微粒與固體微粒的萃取溶液不同，濃度及配製方式如下：

(a) 液體微粒的萃取溶液 (0.001 N NaOH Solution)

取 0.1 N NaOH 溶液 10 ml，置於裝有少量蒸餾水的一升量瓶中，左右搖晃，再加入蒸餾水至量瓶刻度線，置於超音波震盪器中震盪 30 分鐘，使充分混合即可備用。

(b) 固體微粒的萃取溶液 (0.1 N NH₄OH Solution)

取 25% NH₃ 的氨水溶液 15.5ml，置於裝有少量蒸餾水的一升量瓶中，左右搖晃，再加入蒸餾水至量瓶刻度線，置於超音波震盪器中震盪 30 分鐘，使充分混合即可備用。



第四章 結果與討論

4.1 採樣器設計及製造

本研究所設計的三階採樣器組合圖如圖 11，各部的分解圖如圖 12，分成(i)上蓋及可吸入性粉塵入口，(ii) 胸腔區粉塵衝擊器(10 μm -cut)，(iii)可呼吸性粉塵衝擊器(4 μm -cut)，(iv) 後端濾紙底座。詳細的設計圖如圖 15-18。

本研究的三階粒狀污染物採樣器的設計參數如下表所示：

表 1 三階粒狀污染物採樣器之設計參數

可吸入性入口	圓環孔(annular slot)入口內徑=23.5 mm，圓環孔入口外徑=40 mm，上蓋與入口間隙=3 mm，上蓋直徑=5.4 cm。
胸腔區衝擊器	圓形噴嘴六個，噴嘴直徑=3.5 mm，採樣器總流量=3 LPM，以 $\sqrt{S_{tk50}} = 0.39$ 為設計基準，截取氣動直徑=10 μm 。
可呼吸性入口	圓形噴嘴六個，噴嘴直徑=2.0 mm，採樣器總流量=3 LPM，以 $\sqrt{S_{tk50}} = 0.39$ 為設計基準，截取氣動直徑=4 μm 。

圖 13 與 14 分別為本採樣器所設計的圓環孔入口在 3.0 LPM 流量下，風速為 1.1 與 .55 m/s 的入口穿透率與可吸入性粉塵的效率曲線比較圖，可知本設計可以符合可吸入性粉塵的採樣效率規範，風速低時符合度愈佳。

4.2 文獻上不同收集板的收集效率與工作場所粉塵收集效率規範比較評估

較評估

本研究先探討文獻上可以符合可呼吸性粉塵採樣效率規範的收集介質。我們利用截取氣動直徑為分母先將氣動直徑無因次化，再將文獻上的收集效率數據與無因次化的氣動直徑作圖，並與可呼吸性粉塵採樣效率規範比對，如此即可找出可以符合可呼吸性曲線斜率的收集介質。

圖 19 所示為 Sioutas(1999)設計的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 個人採樣器的評估結果，我們發現塗油之多孔金屬收集效率曲線與可呼吸性曲線在截取氣動直徑值附近頗吻合，但是越往曲線的右半部份，收集效率逐漸降低，且可信賴的實驗點數並不多。圖 20 為(Tsai et al.2001)的個人固氣分離器內的多孔金屬片衝擊器的評估結果，發現多孔金屬收集效率曲線較可呼吸性曲線陡峭，曲線斜率並不吻合。

圖 21 為 Koutrakis(2001)的慣性衝器的評估結果，他們利用聚酯泡綿和多孔金屬片當作慣性衝擊器的收集板，且在不同雷諾數下進行測試。我們將此兩種收集板的收集效率曲線與可呼吸性曲線進行比對，發現聚酯泡綿收集效率曲線的斜率與可呼吸性曲線有著很高的吻合度(圖 21(b))，但是塗油的多孔金屬板的收集效率曲線過於陡峭(圖 21(a))。圖 22 為 Sioutas(2002)的慣性衝器的評估結果，他利用鐵弗龍

(Teflon)和鋁箔當作個人採樣用多階衝擊器的衝擊板，我們比對此兩種衝擊板的收集效率曲線和可呼吸性曲線，發現其曲線斜率吻合度也不夠高。根據以上的文獻回顧可知，使用聚酯泡綿當作收集介質時，收集效率曲線與可呼吸性曲線可以有良好的吻合度，可作為本研究設計的三階衝擊器的收集板。



4.3 本研究對不同收集板的測試結果

如圖 23 所示，我們分別使用不同孔隙度的多孔金屬片 (porosity 為 100、40、20 及 5 μm)、聚酯泡綿 (100 ppi 和 65 ppi) 及鋁箔當作衝擊板，在不同的流量 (1.5 LPM、2 LPM 和 2.5 LPM) 及不同的噴嘴大小 ($W=3.6\text{mm}$ 和 $W=2.6\text{mm}$) 下，先使用一個單階的慣性衝擊器進行收集效率實驗，使用的測試系統如圖 10。慣性衝擊器的噴嘴直徑為 2.6 mm 或 3.6 mm，噴嘴與衝擊板距離：5.2 mm ($D=2.6\text{ mm}$)、3.6 mm ($D=3.6\text{ mm}$)，收集板直徑：12 mm。

4.3.1 噴嘴直徑為 2.6 mm 的測試結果



首先，我們固定流量為 1.5 LPM、噴嘴直徑為 2.6 mm，使用多孔金屬片、聚酯泡綿和鋁箔當做收集板進行測試，結果如圖 24、圖 25 和圖 26 所示，發現收集效率的斜率及截取氣動直徑值並無法與可呼吸性曲線吻合。聚酯泡綿的截取氣動直徑值為 2.71 μm (100 ppi) 及 3.07 μm (6.5 ppi)，比 4.0 μm 低很多，鋁箔的截取氣動直徑值太高為 4.55 μm ，且效率曲線過於陡峭 (圖 24)。多孔金屬的截取氣動直徑值為 4.18 μm (孔隙直徑 100 μm) 及 4.43 μm (孔隙直徑 40 μm)，4.61 μm (孔隙直徑 20 μm) 及 4.65 μm (孔隙直徑 5 μm)，均比 4.0 μm 高，其中且效率曲線過於陡峭 (圖 25，26)。當孔隙直徑愈大，截取氣動直

徑愈小，孔隙直徑為 100 μm 的截取氣動直徑與其他三種孔隙直徑的差別最大，其他三種孔隙直徑的截取氣動直徑與鋁箔十分接近。不同收集板在不同流量下的截取氣動直徑列於表 2。

接著將流量增為 2.0 LPM、噴嘴大小仍維持為 2.6 mm，使用多孔金屬片、聚酯泡綿和鋁箔當做收集板進行測試，結果如圖 27、圖 28 和圖 29 所示，發現收集效率的斜率及截取氣動直徑值並無法與可呼吸性曲線吻合。聚酯泡綿的截取氣動直徑值為 2.26 μm (100 ppi) 及 2.45 μm (6.5 ppi)，與 1.5 LPM 時相較，截取氣動直徑比 4.0 μm 低更多，鋁箔的截取氣動直徑值 4.1 μm ，十分接近 4.0 μm ，但是效率曲線過於陡峭（圖 27）。圖 28，29 及表 2 中，多孔金屬的截取氣動直徑值為 3.35 μm (孔隙直徑 100 μm) 及 3.89 μm (孔隙直徑 40 μm)，4.0 μm (孔隙直徑 20 μm) 及 4.08 μm (孔隙直徑 5 μm)，後三者均十分接近 4.0 μm ，效率曲線幾乎與鋁箔一樣，且過於陡峭。孔隙直徑 100 μm 時的截取直徑最低與其他三種明顯不同，效率曲線也過於陡峭。

4.3.2 噴嘴直徑為 3.6 mm 的測試結果

然後我們改變噴嘴直徑為 3.6mm，使用多孔金屬片、聚酯泡綿和鋁箔當做收集板進行測試，當流量為 2.0 LPM 時結果如圖 30-32 所示，流量為 2.5 LPM 時結果如圖 33-35 所示。我們發現在 2.0 LPM 時使用 100 ppi 的聚酯泡綿為衝擊板時的收集效率曲線可以和可呼吸性曲線吻合（圖 30），截取氣動直徑值為 $3.82\ \mu\text{m}$ ，比較可呼吸性曲線之 $4\ \mu\text{m}$ 的誤差只在 5% 左右。100 ppi 的聚酯泡綿的截取氣動直徑雖然亦為 $3.82\ \mu\text{m}$ ，但是當氣動直徑在 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上時收集效率徧高。其他的收集板(多孔金屬片和鋁箔)的收集效率均和 5.3.1 節的結論相同，效率曲線過於陟階，無法與可呼吸性曲線吻合，且截取氣動直徑不符合可呼吸性粉塵的規範（圖 31, 32）。當流量為 2.5 LPM 時，聚酯泡綿的截取氣動直徑已徧離 $4.0\ \mu\text{m}$ ，其他的收集板(多孔金屬片和鋁箔)的收集效率曲線也是過於陟階，無法與可呼吸性曲線吻合，且截取氣動直徑不符合可呼吸性粉塵的規範（圖 33-35）。不同收集板的詳細的截取氣動直徑值請參考表 2。

4.4 固體微粒對不同收集板的表面負載率測試

我們分別使用多孔金屬片 (porosity 為 100 μ m) 和鋁薄當作收集板，在流量固定為 2.5 LPM、噴嘴大小為 3.6mm 下，進行有塗敷矽油之收集板及未塗敷矽油之收集板的微粒負載率測試。另外，收集板表面負載的固體微粒質量 (M) 可利用下式計算：

$$M = \sum_j^m \sum_i^n N_{i,j} \cdot Eff_{i,i} \cdot \rho_p \frac{\pi d_{pi}^3}{6}$$

上式中 i 為氣動直徑偵測儀中第 i th 個微粒氣動直徑， j 為第 j th 分鐘， Eff 為微粒收集效率， ρ_p 為微粒密度， d_p 為微粒粒徑。

4.4.1 收集板塗敷黏著劑



首先，我們固定流量為 2.5 LPM、噴嘴大小為 3.6mm，使用有塗敷矽油之多孔金屬片 (porosity 為 100 μ m) 和鋁薄當作收集板。在不同的收集時間下，計算有塗敷矽油之收集板對固體微粒 KCl 的收集效率曲線，結果如圖 36~39 所示。發現塗敷矽油之多金屬片 (孔隙度為 100 μ m) 其固體微粒 KCl 負載質量為 0.01~1.26 mg，在 \sqrt{St} 大於 0.6 時，固體微粒 KCl 的最高收集效率大致維持在 95% (如圖 36 所示)。直至固體微粒 KCl 負載質量為 1.55~2.33 mg，在 \sqrt{St} 大於 0.6 時，固體微粒 KCl 的最高收集效率才有輕微下降的趨勢 (如圖 37 所示)。理由是因為多孔金屬片的孔洞結構會保持著矽油，避免矽油被噴嘴下來的氣

流沖走，收集板上累積的微粒層含有矽油，因此具有較大的微粒收集容量，可避免固體微粒的彈跳並增加微粒的收集效率。然而，塗敷矽油之鋁薄，其固體微粒 KCl 負載質量為 0.01~2.33 mg，在 \sqrt{St} 大於 0.6 時，固體微粒的收集效率並不如有塗敷矽油之多孔金屬片(如圖 38 和圖 39 所示)。理由是塗敷在鋁箔上的矽油因為被微粒層所覆蓋住了，所以造成收集效率的低落。

4.4.2 收集板未塗敷黏著劑

首先，我們固定流量為 2.5 LPM、噴嘴大小為 3.6mm，使用沒有塗敷矽油之多孔金屬片(porosity 為 100 μ m)和鋁薄當作收集板。在不同的收集時間下，計算沒有塗敷矽油之收集板對固體微粒 KCl 的收集效率曲線，結果如圖 40~43 所示。發現未塗敷矽油之多金屬片(孔隙度為 100 μ m)，其固體微粒 KCl 負載質量為 0.01~0.84 mg，在 \sqrt{St} 大於 0.6 時，固體微粒 KCl 的最高收集效率約為 85%(如圖 40 和圖 41 所示)，低於有塗敷矽油之多孔金屬片收集效率。然而，未塗敷矽油之鋁薄會隨著負載質量的增大，其固體微粒最高收集效率也大約在 80%(如圖 42 和圖 43)。原因是因為收集板表面所累積的微粒層已經高到會被噴嘴下來的氣流沖走，或是造成後續微粒撞擊在微粒層上的彈跳現象。

4.5 本研究對三階粉塵採樣器之測試結果

4.5.1 以 APS 測定採樣器的微粒收集效率

如圖 10 所示，我們利用超音波霧化器產生固定之微粒粒徑分佈，以 APS 測定本採樣器的微粒收集效率。首先，我們固定採樣流量為 2LPM，選定聚酯泡綿(100ppi)當作本採樣器之收集板，以 APS 進行本採樣器的微粒收集效率測試。結果發現，微粒粒徑在 2~5 μm 時，微粒的穿透效率曲線有符合可呼吸性曲線的趨勢。然而，當微粒粒徑大於 5 μm 時，微粒的穿透效率有明顯提高且不符合可呼吸性曲線的現象,這是因為超音波霧化器所產生之粒徑分佈其微粒波峰約在 4 μm ，因此較大的微粒數目濃度不夠且在 4 μm 前端的階層有損失現象，造成對於大微粒有錯估穿透效率的現象。因而這部份的實驗需用 VOMAG 產生單徑微粒再進行測試，如下所述。

4.5.2 以 VOMAG 測定採樣器之微粒穿透效率

如圖 9 所示，我們使用 VOMAG 產生單一粒徑之液體微粒，粒徑大小在 2~15 μm ，然後將本採樣器置入測試腔體中進行採樣。我們根據 4.5.1 所測試的結果。選用 100ppi 之泡棉當作收集板，固定採樣流量為 2LPM，使用 VOMAG 產生單徑微粒，進行微粒穿透效率的測試。結果發現，微粒的穿透效率曲線可以與胸腔區曲線吻合(如圖 44

所示)，截取氣動直徑值為 $9.44\mu\text{m}$ ，比較胸腔區區線之 $10\mu\text{m}$ 的誤差只在 5.6% 左右。圖 45 顯示微粒的穿透效率曲線可以與可呼吸性曲線吻合，截取氣動直徑值為 $3.94\mu\text{m}$ ，比較可呼吸性區線之 $4\mu\text{m}$ 的誤差只在 1.6% 左右。然而，本採樣器所設計之可吸入性穿透效率曲線比 ACGIH 規定之可吸入性穿透效率曲線還高(如圖 46 所示)，顯示有其改進的空間。另外，我們亦針對本採樣器內部的微粒損失進行研究，結果發現，本採樣器內部之微粒損失僅發生在 $4\mu\text{m}$ nozzle plate 上面，其微粒平均損失率都低於 5%(如圖 47 所示)。

4.6 泡棉之微粒負載率測試

我們亦將 100ppi 之聚酯泡綿進行微粒負載率的測試，結果發現在 20~60 分的採樣時間內，100ppi 之聚酯泡綿對微粒的收集效率大約為 90%(如圖 48 所示)。然而，在 100~120 分的採樣時間內，100ppi 之聚酯泡綿對微粒的收集效率約為 85%(如圖 49 所示)，顯示泡棉對微粒具有很高的收集效率，且收集效率不容易受到採樣時間的長短而有所改變。原因是因為泡棉具有高孔隙度、流體易流動穿透及不需塗敷黏著劑之優點，並可以抑制微粒的彈跳及再揚起的現象。

第五章 結論

5.1 對不同收集板的收集結果

依照本研究對不同收集板的測試結果顯示，我們發現當流量為 2 LPM、噴嘴大小為 3.6mm，使用 100 ppi 的泡綿當作衝擊板，其收集效率曲線斜率與可呼吸性曲線吻合，截取氣動直徑為 3.82 μm ，誤差僅在 5%左右。

5.2 本採樣器之粉塵穿透效率測試結果

依照本研究對三階粉塵採樣器的測試結果顯示，我們發現當流量為 2LPM、六個噴嘴(每個噴嘴大小為 3.5mm)，使用 100ppi 的泡棉當作衝擊板，其粉塵穿透效率曲線與胸腔區曲線吻合，截取氣動直徑值為 9.44 μm ，與 ACGIH 胸腔區曲線之 10 μm 的誤差只在 5.6%左右。我們亦發現粉塵穿透效率曲線與可呼吸性曲線吻合，截取氣動直徑值為 3.94 μm ，與 ACGIH 可呼吸性曲線之 4 μm 的誤差只在 1.6%左右。

第六章 建議

目前的已完成的單孔衝擊器的實驗為可呼吸性曲線與各種收集介質之穿透效率曲線比較圖，測試之收集介質有多孔金屬片(100 μm 、40 μm 、20 μm 和 5 μm)、鋁箔和聚酯泡綿(100ppi 和 65ppi)，測試用的固體和液體微粒之粒徑大小為 4 μm 。將來可以再針對固體粉塵負荷對收集效率的影響作更完整的研究。

針對我們所設計之三階粉塵採樣器，測試的結果發現，本採樣器大致上可以符合胸腔區穿透效率曲線和可呼吸性穿透效率曲線。然而，本採樣器之可吸入性穿透效率曲線高估 ACGIH 規定之可吸入性曲線。所以未來我們必須設置風洞，使用不同的風速來測定本採樣器之可吸入性入口是否符合 ACGIH 規定之可吸入性曲線，並增加固體微粒的測試，以增加本採樣器對粉塵收集效率的可靠度。

第七章 參考文獻

蔡春進,石東生,1994;“粉塵分粒裝置採樣器之性能評估研究”,勞工安全研究季刊,第2卷:23-34。

蔡春進,石東生,蕭宏光,林國清,1997;“粉塵負荷及靜電量對10mm尼龍旋風器的採樣效率的影響”,勞工安全研究季刊,第5卷,第2期:27-38。

蔡朋枝,行政院勞委會勞工安全衛生研究所,93年度科技研究發展計畫書,“鋼鐵業及鉛蓄電池製造業氣膠微粒分佈量測技術之開發與驗證”。

賴全裕,陳志傑,黃景祥,石東生,黃文玉,2000,“可呼吸性氣膠分徑採樣器效能比較研究”,勞工安全衛生季刊,8:1-18.

賴全裕,陳志傑,石東生,葉文裕,陳正堯,1997;“氣懸微粒分徑採樣器的研發”,第5卷,第2期:39-49。

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), 1984, “Particles Size-Selective Sampling in the Workplace”, In Annals of the American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, 23-100.

Bartley, D.L., and Breuer, E.M., 1982, “Analysis and Optimization of the Performance of the 10mm Cyclone”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 43:520-528.

Baron, P., and John, W., 1999, “Sampling for Thoracic Aerosols”, in Particle Size-Selective Sampling for Particulate Air Contaminants, ACGIH, Cincinnati.

- Chen, C.C., Lai, C.Y., Shih, T.S., Yeh, W.Y., 1998, "Development of Respirable Aerosol Samplers Using Porous Foams", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 59(11):766-773.
- Chen, C.C., Lai, C.Y., Shih, T.S. and Hwang, J.S., 1999, "Laboratory Performance Comparison of Respirable Samplers", *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 60:601-611.
- Heikkinen, M.S.A., and Harley, N.H. 2000, "Experimental Investigation of Sintered Porous Metal Filters", *J. Aerosol Sci.* 31: 721–738.
- Hinds, W. C., 1999, *Aerosol Technology*, 2nd ed.
- Kavouras, G., and Koutrakis, P., 2001, "Use of Polyurethane Foam as the Impaction Substrate/Collection Medium on Conventional Inertial Impaction", *Aerosol Sci. Technol.* 34: 46–56.
- Li, S. N., Lundgren, D. A., Rovell-Rixx, D., 2000, "Evaluation of Six Inhalable Aerosol Sampler," *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 61:506:516.
- Linden, G., and Kenny, L.C., 1992, "The Performance of Respirable Dust Samplers: Bias, Precision and Inaccuracy", *Ann. Occup. Hyg.*, 36:1-22.
- Marjamaki, M., and Keskinen, J., 2004 ; "Effect of impaction plate roughness and porosity on collection efficiency," *J Aerosol Sci.* 35: 301-308.
- Mark, D.,and Vincient, J. H., 1986, "A New Personal Sampler for Airborne Total Dust in Workplaces," *Ann. Occup. Hyg.*, 30:89-102
- Misra, C., Singh, M., Shen, S., Hall, P.M., and Sioutas, C., 2002. "Development and evaluation of a personal cascade impactor sampler (PCIS)." *J Aerosol Science* 33, 1027—1047.

Rubow, K.L., Marple, V.A., Olin, J., and Mccawley, M.A., 1987, “A Personal Cascade Impactor: Design , Evaluation and Calibration”, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (48): 532–538.

Sioutas, C, Chang, M. C., Kim, S, Koutrakis, P., and Ferguson, S. T., 1999. “Design and Experimental Characterization of a PM₁ and PM_{2.5} Personal Sampler”, *J Aerosol Sci.* 30:693-707.

Tsai, C.J., Huang, C.H., Wang, S.H., and Shih, T.S., 2001, “Design and Testing of a Personal Porous-Metal Denuder”, *Aerosol Sci. Technol.* 35: 611–616.

Witschger, O., Fabries, J.F., Gorner, P., 1997, “Particle Entry Efficiency of an Annular Slot Aerosol Sampler”, *J. Aerosol Sci.* 28: S679–S680.



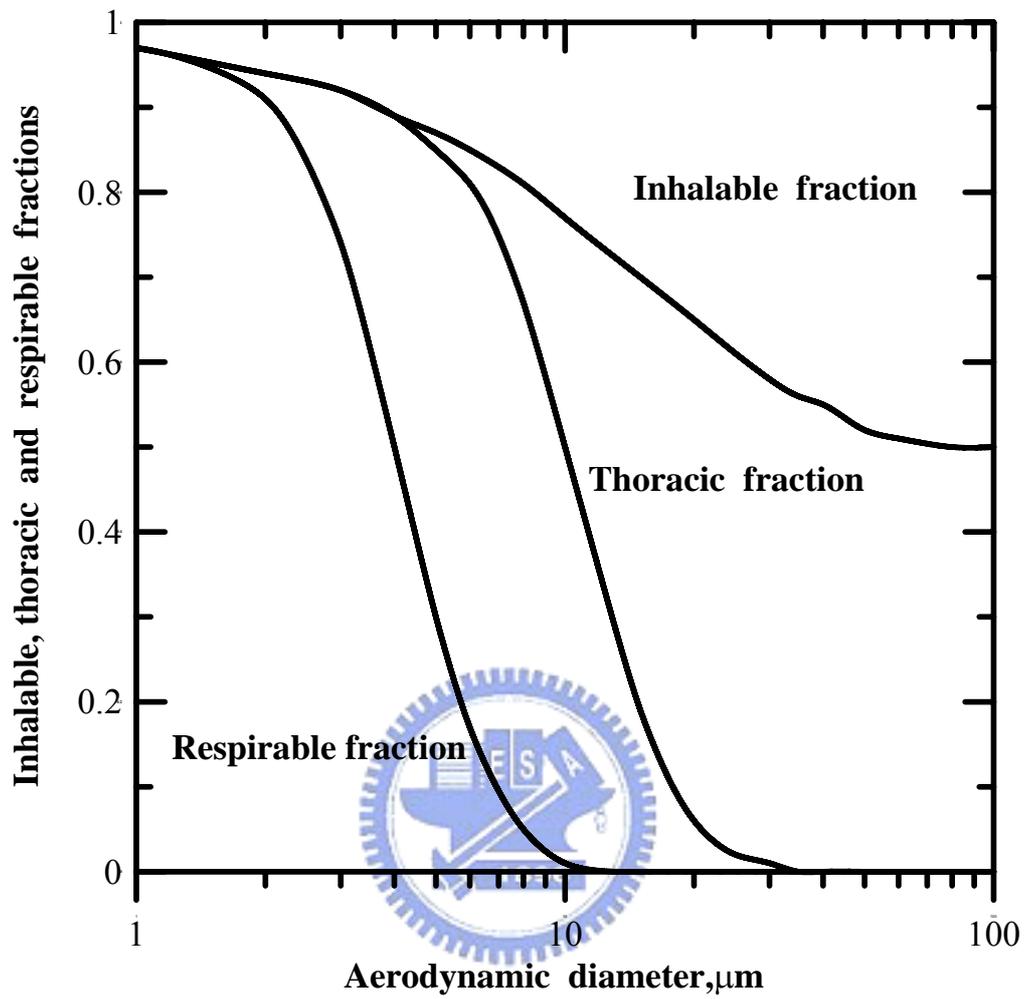


圖 1.國際新定義分徑曲線示意圖

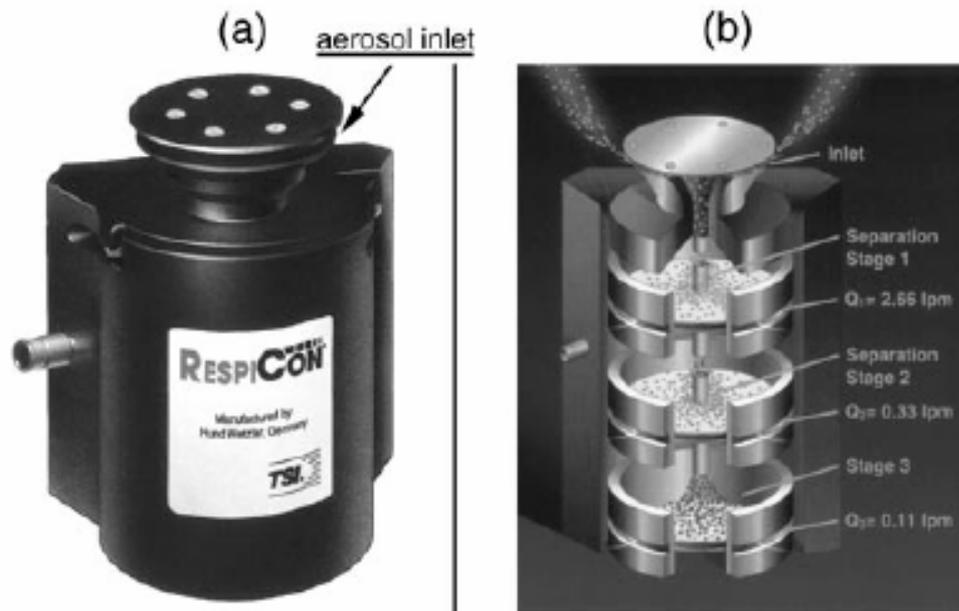


圖 2. TSI 的 Respicon 採樣器



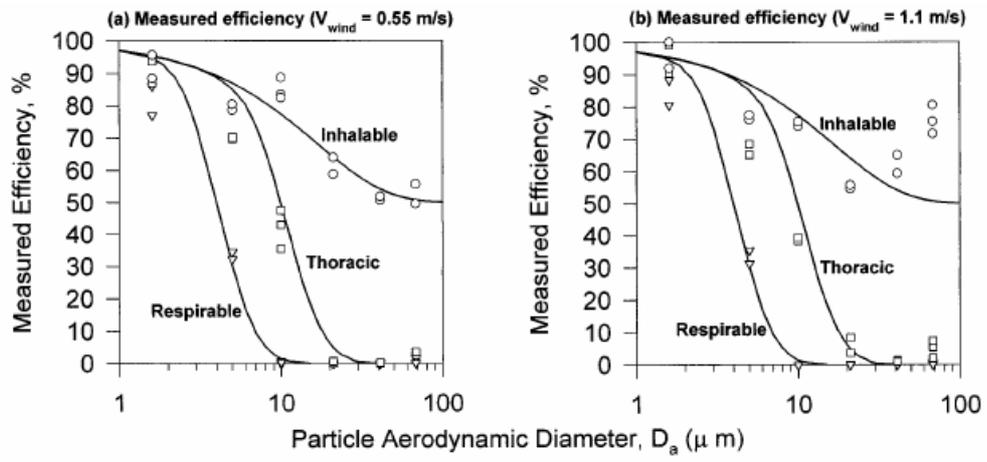
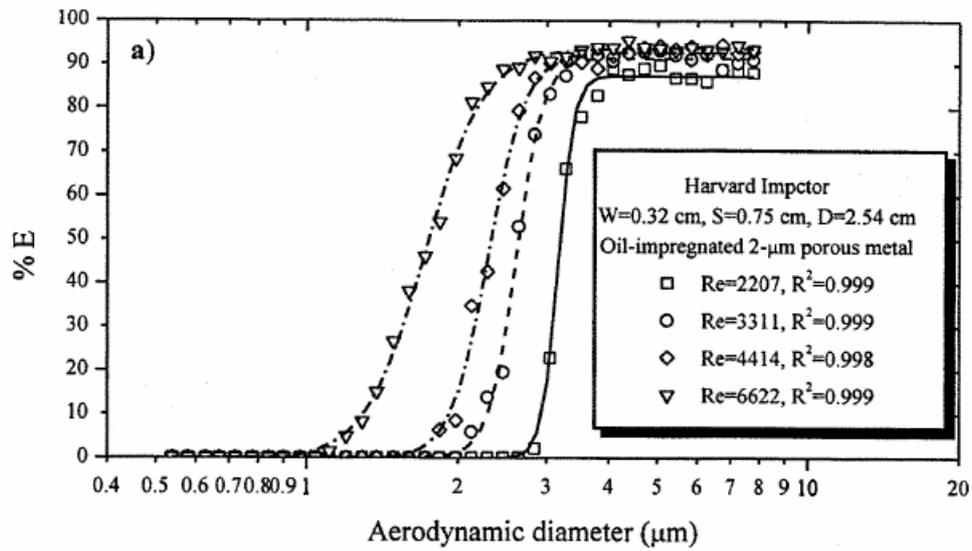


圖 3. TSI Respicon 採樣器在不同風速下的三種粉塵的採樣效

率



(a)



(b)

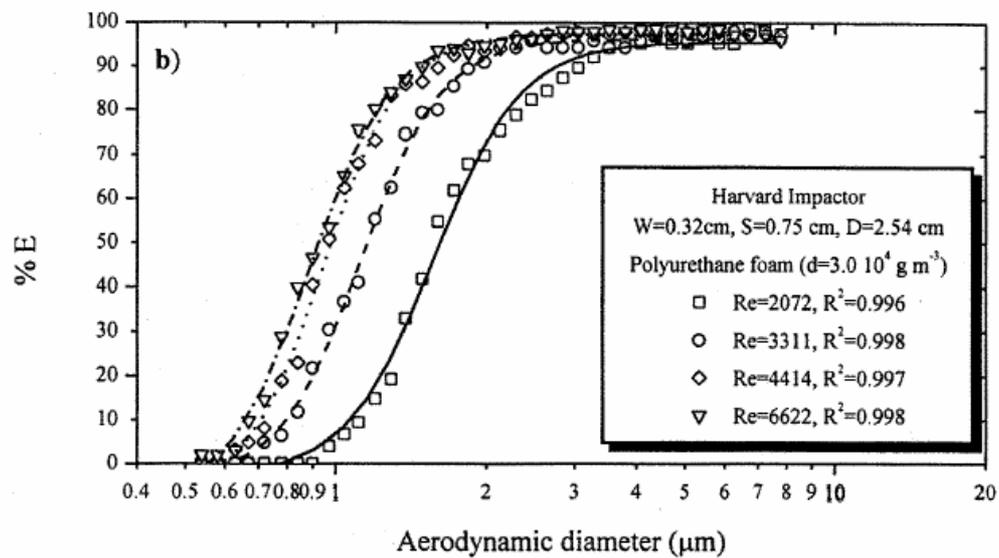
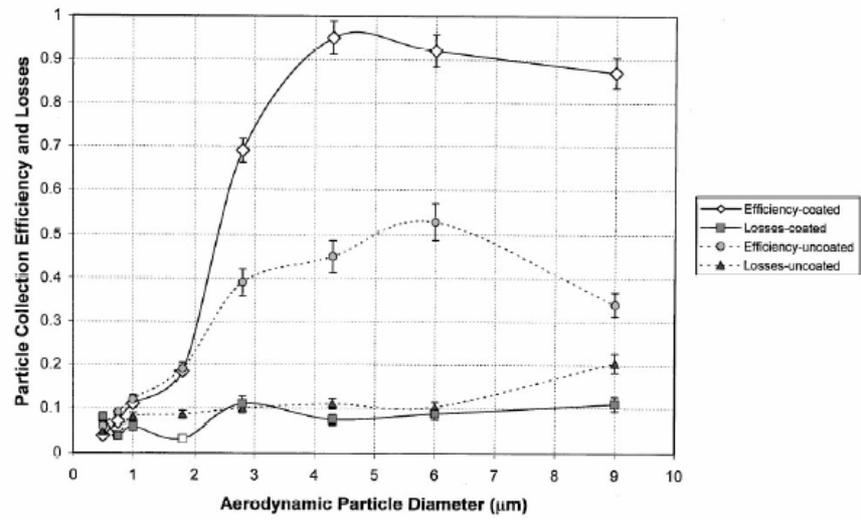


圖 4. Harvard 衝擊器在不同收集介質(a)塗油的 $2\text{-}\mu\text{m}$ 多孔金屬板

(b) PUF 之不同雷諾數下的收集效率曲線。

(a)



(b)

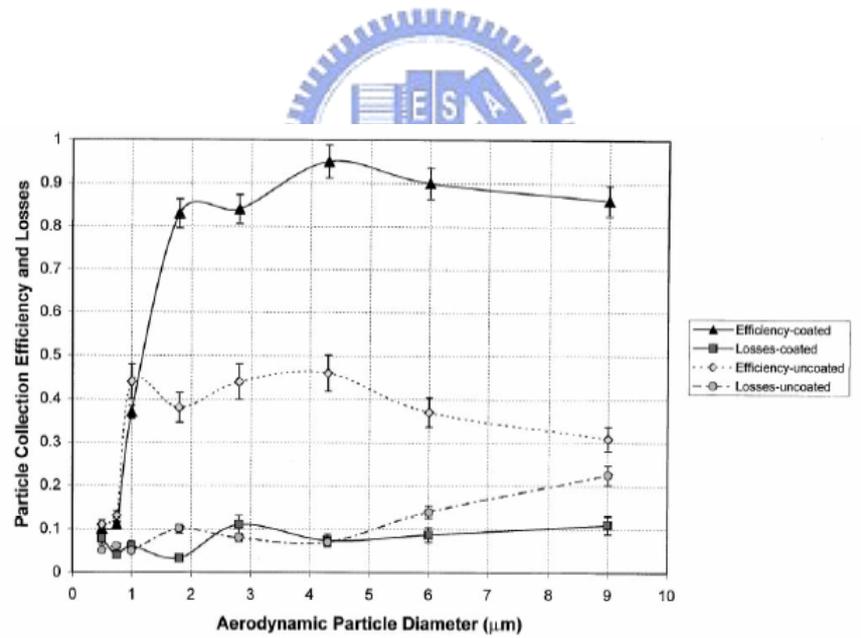


圖 5 Sioutas et al.(1999)之 (a)PM_{2.5}(b)PM₁個人衝擊採樣器的收集效率

曲線及微粒在採樣器內的損失率。

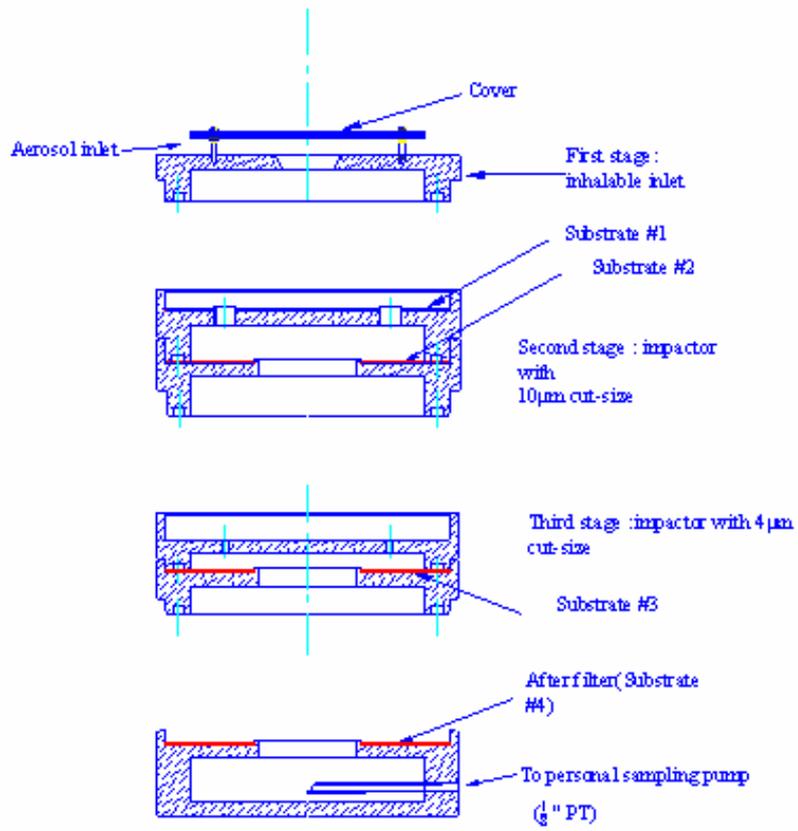


圖 6 本研究擬設計的個人採樣器示意圖

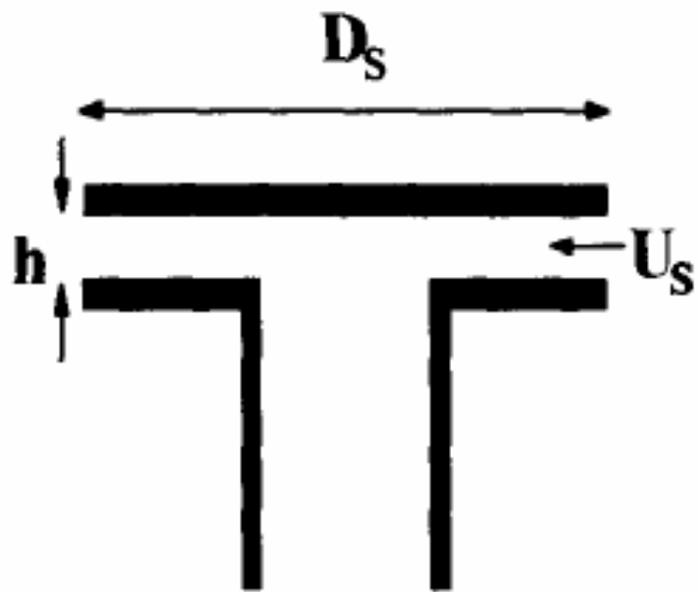


圖 7 圓環孔可吸入性入口(Witschger et al., 1997)



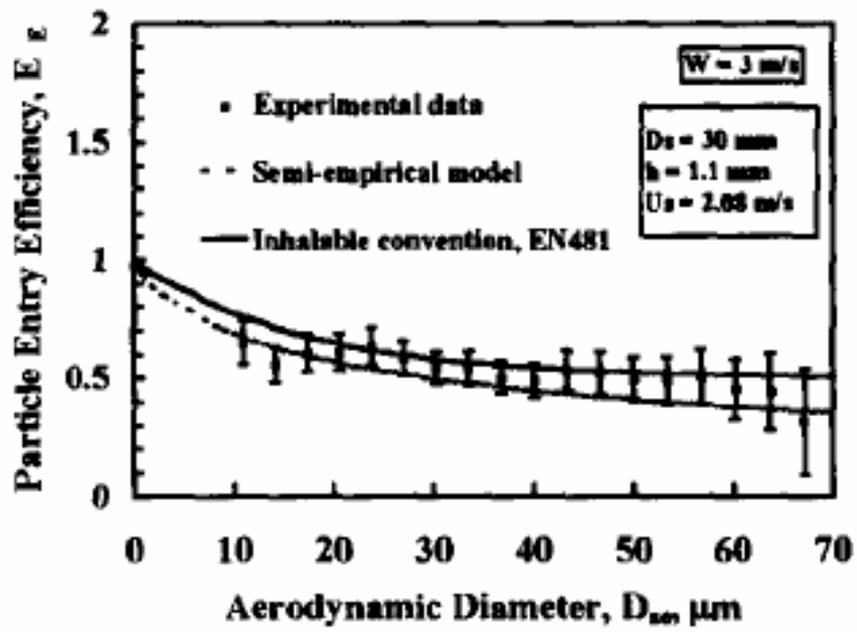


圖 8 圓環孔可吸入性入口的效率曲線(Witschger et al., 1997)



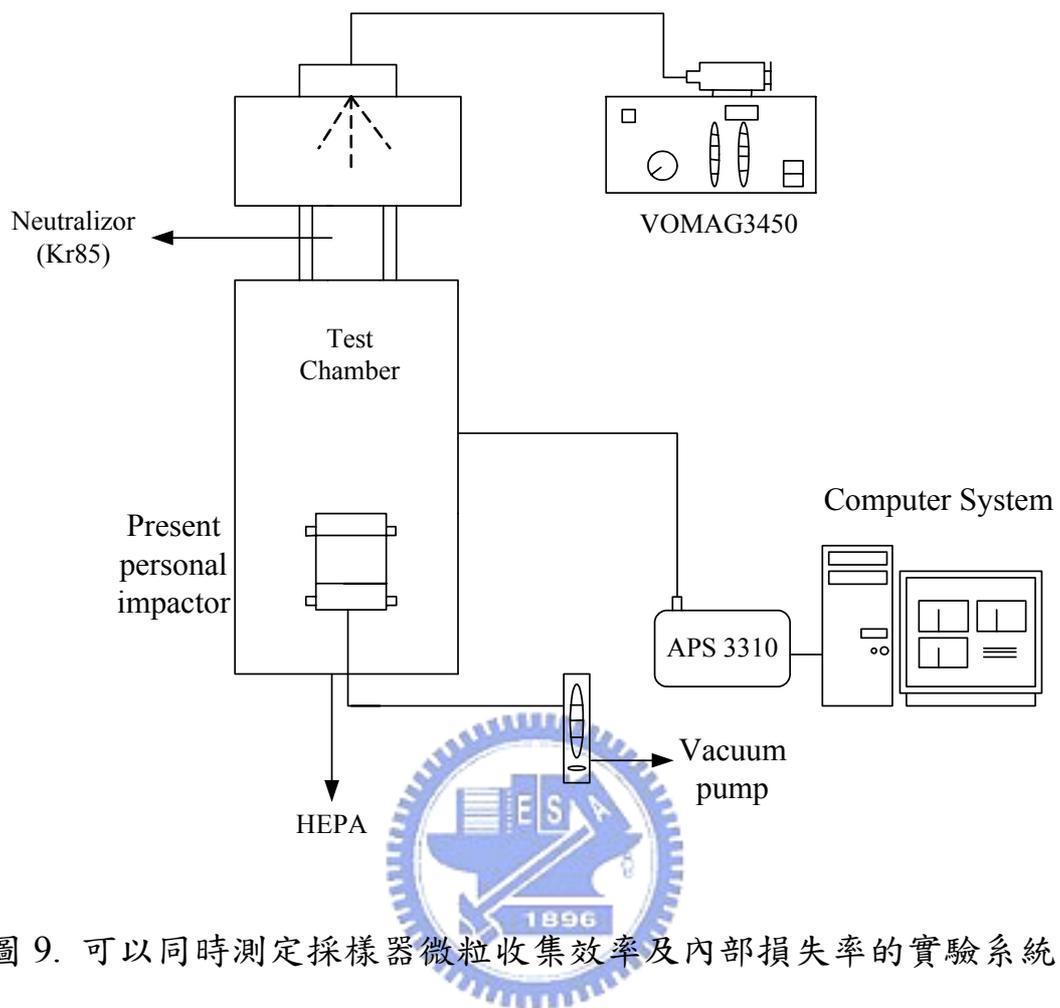


圖 9. 可以同時測定採樣器微粒收集效率及內部損失率的實驗系統。

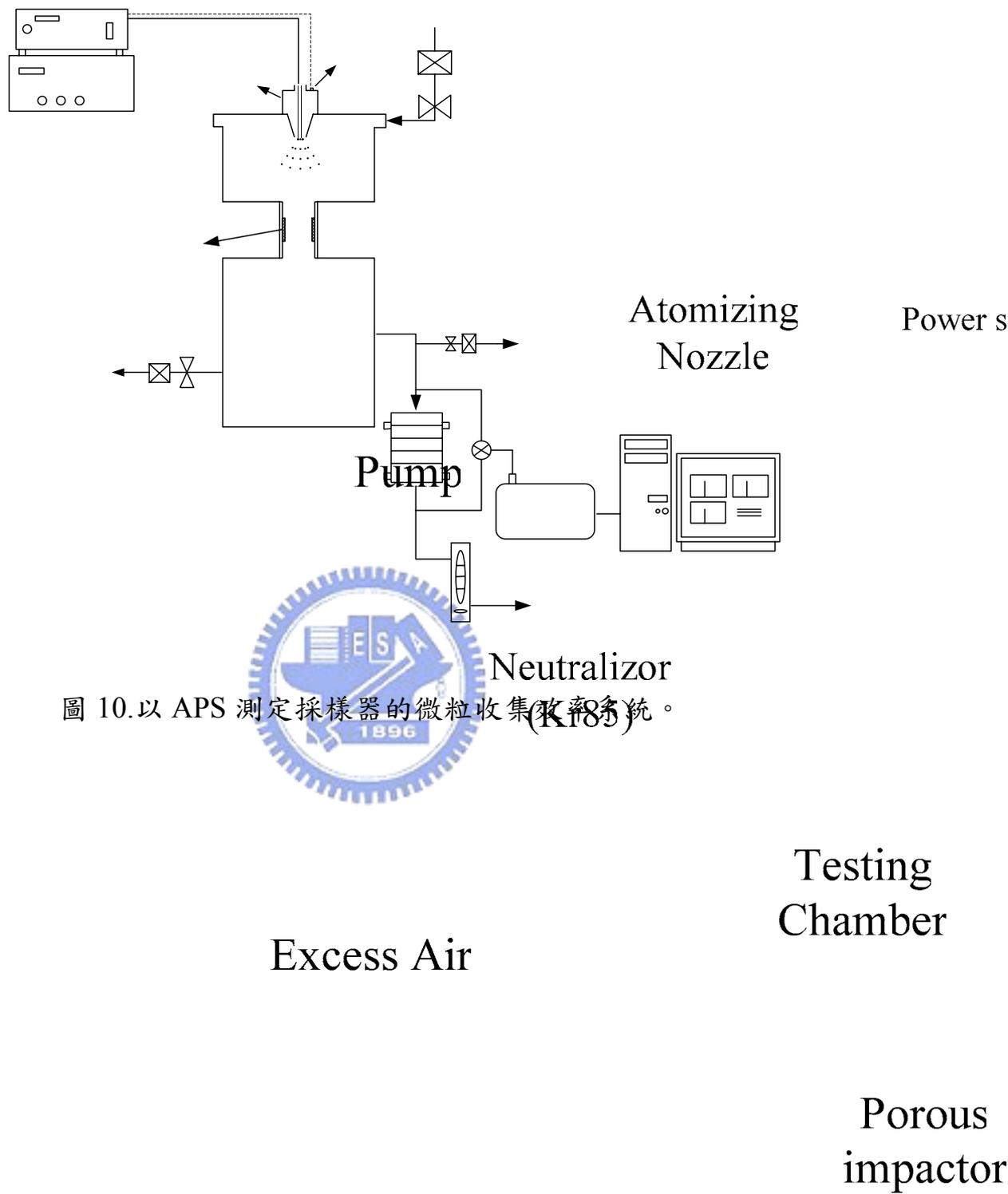


圖 10.以 APS 測定採樣器的微粒收集效率系統。



圖 11.三階粒狀污染物採樣器組合圖。



圖 12. 三階粒狀污染物採樣器各部的分解圖。



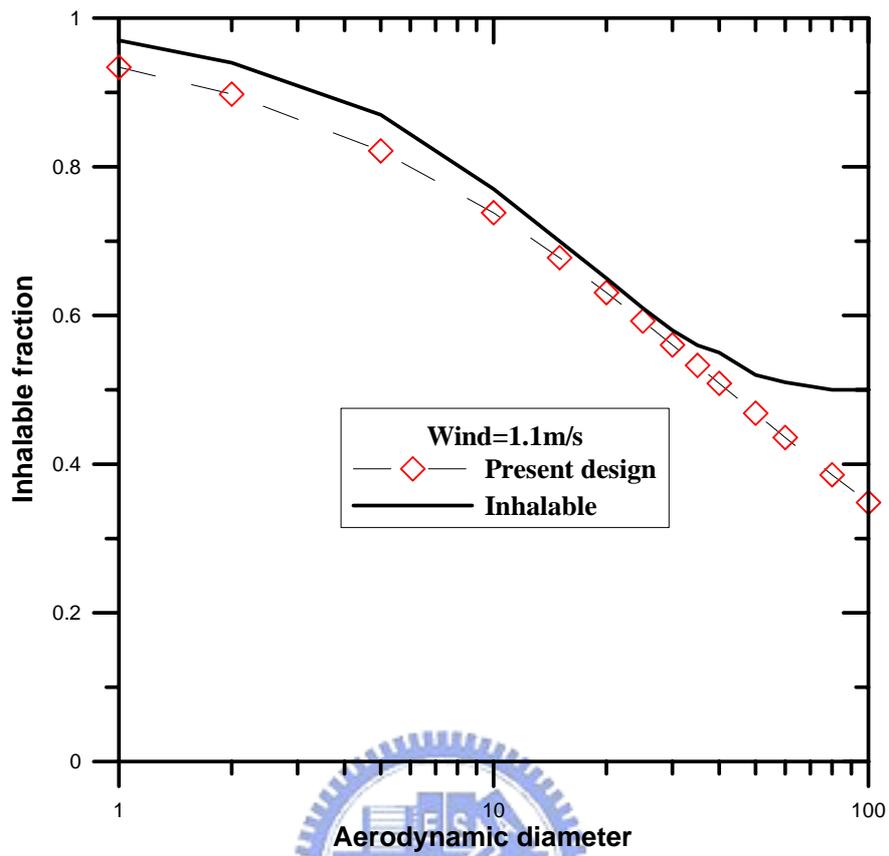


圖 13 風速=1.1 m/s 時可吸入性效率曲線與入口效率比較圖，流量為 3 LPM。

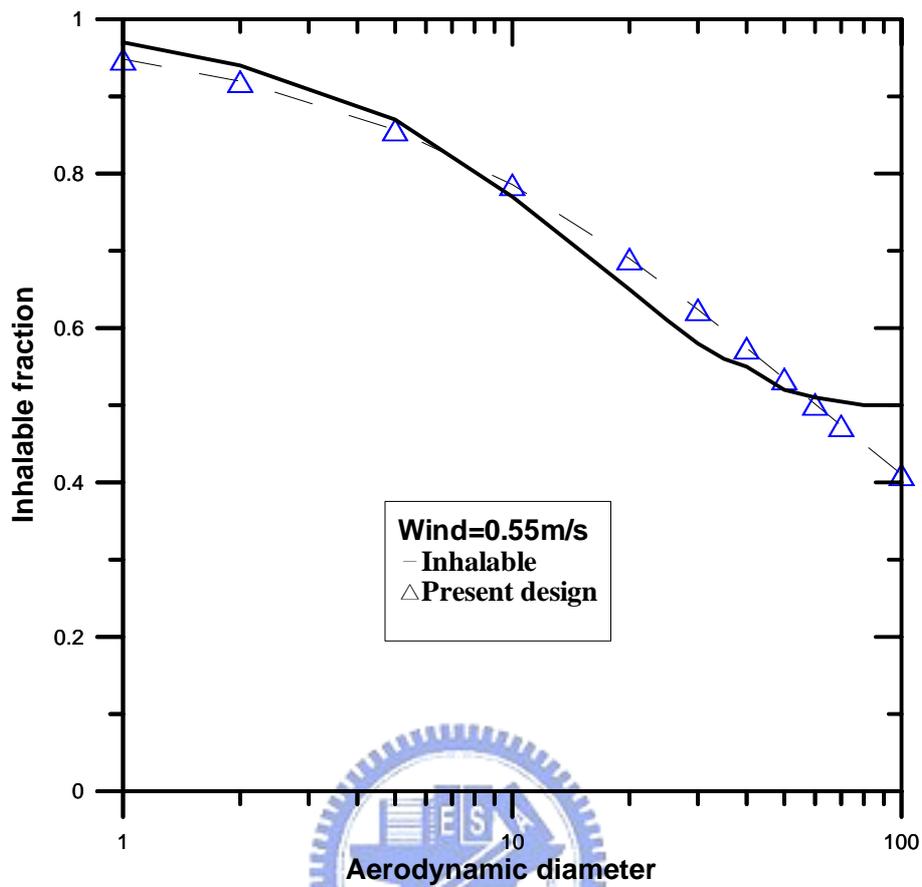


圖 14.風速=0.55 m/s 時可吸入性效率曲線與入口效率比較圖，流量為 3 LPM。

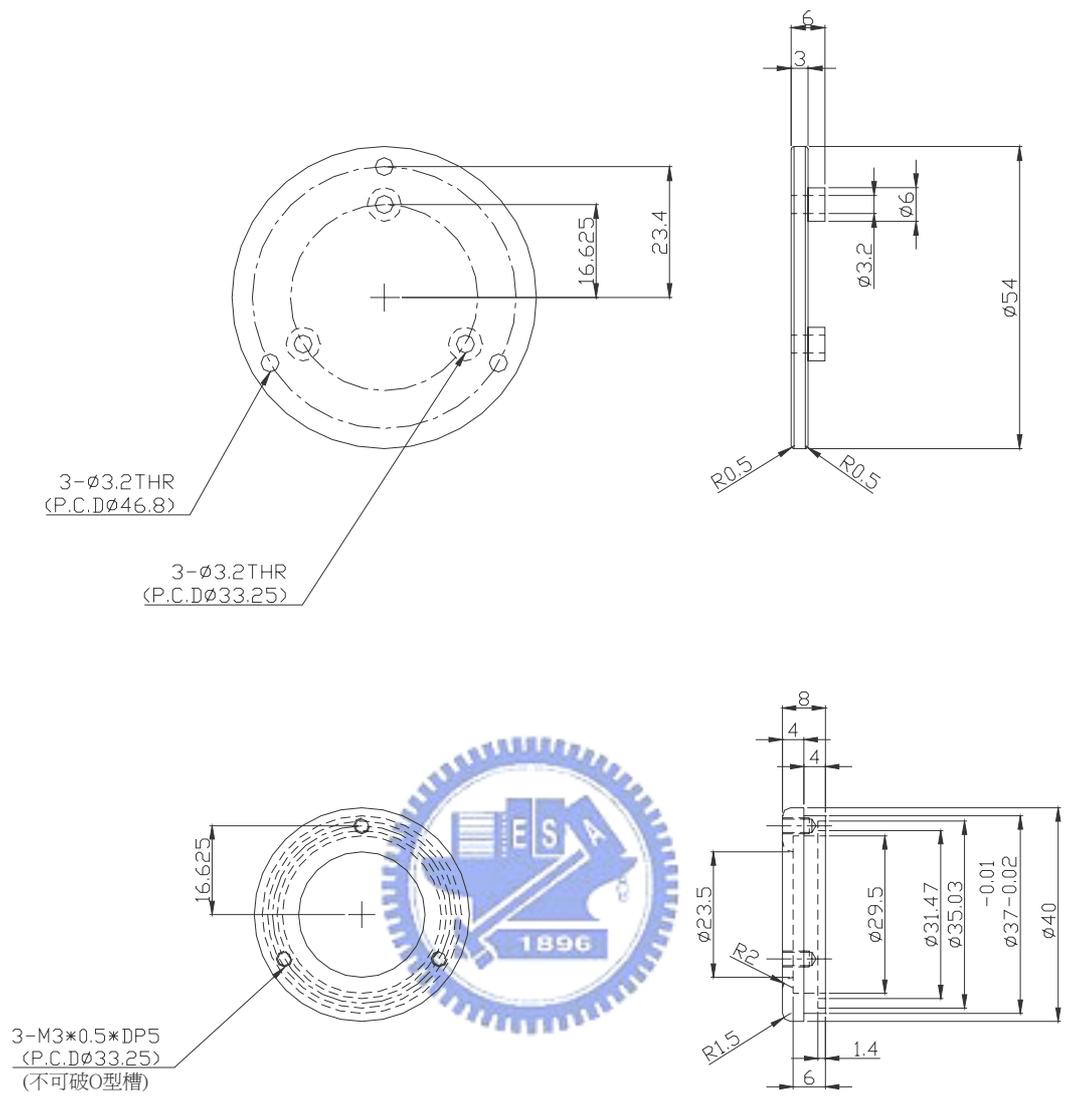


圖 15. 三階粒狀污染物採樣器的上蓋(上圖)及可吸入性粉塵入口(下圖)。

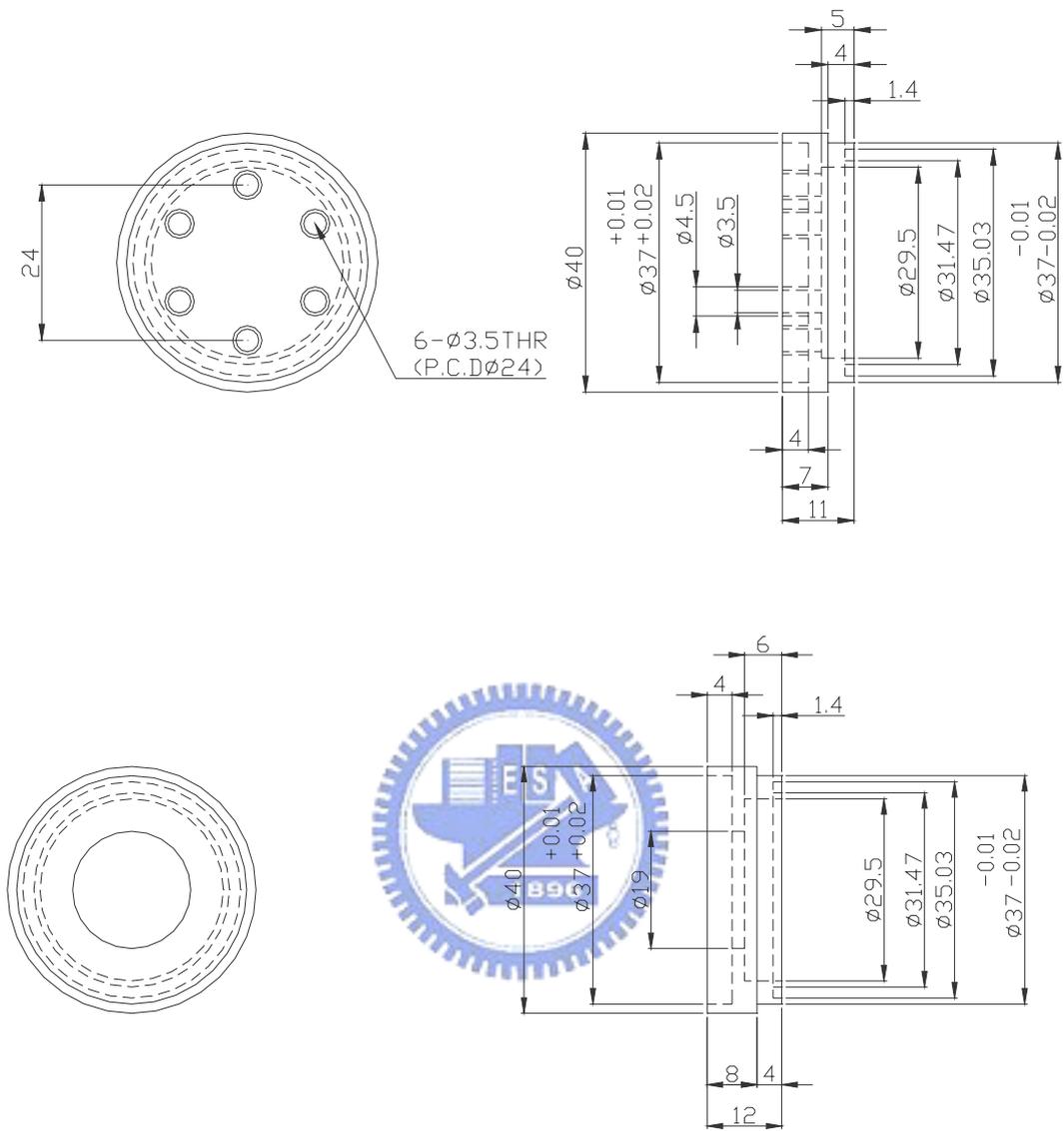


圖 16. 胸腔區粉塵衝擊器(10 μ m-cut)噴嘴 (上圖) 及收集板 (下圖)。

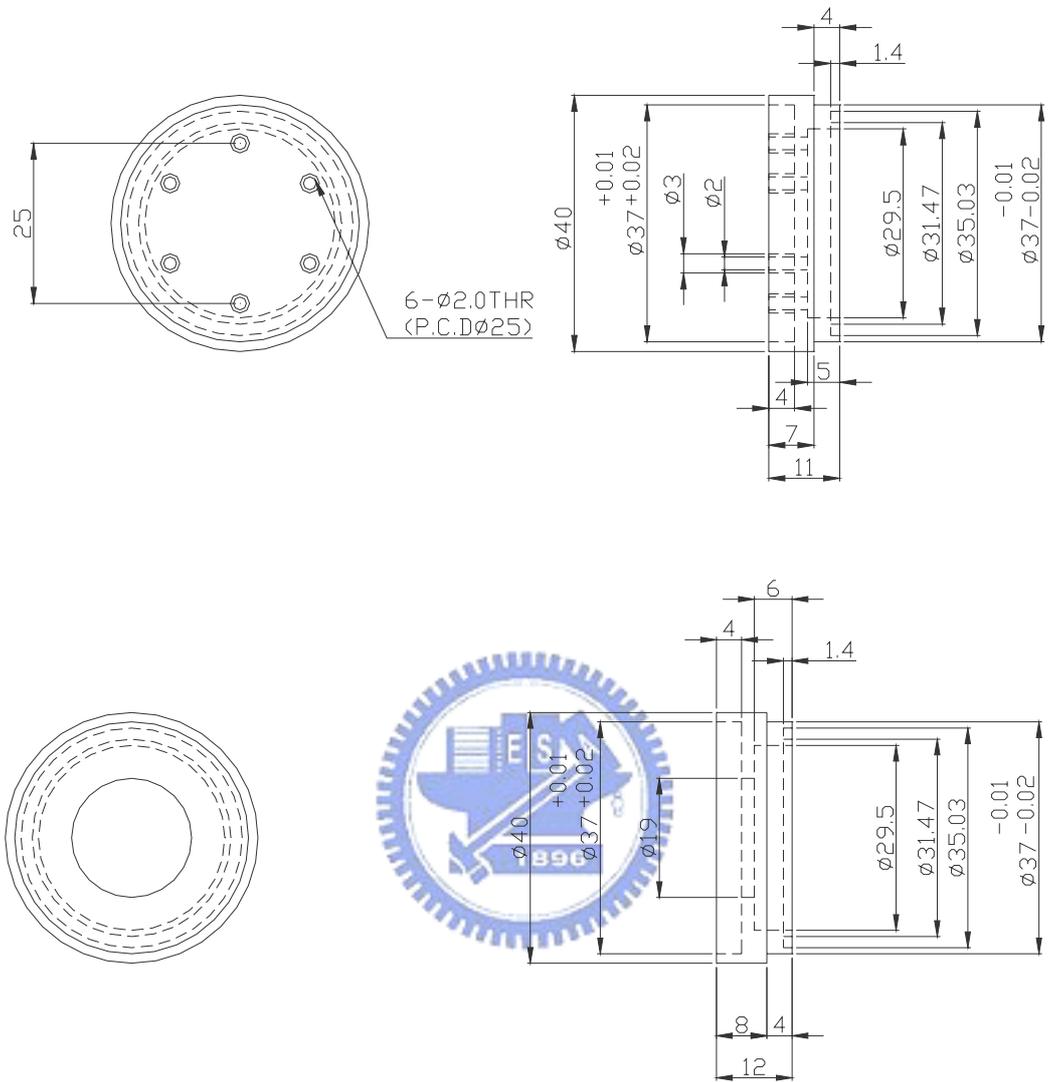


圖 17. 可呼吸性粉塵衝擊器(4 μm -cut)噴嘴(上圖)及收集板(下圖)。

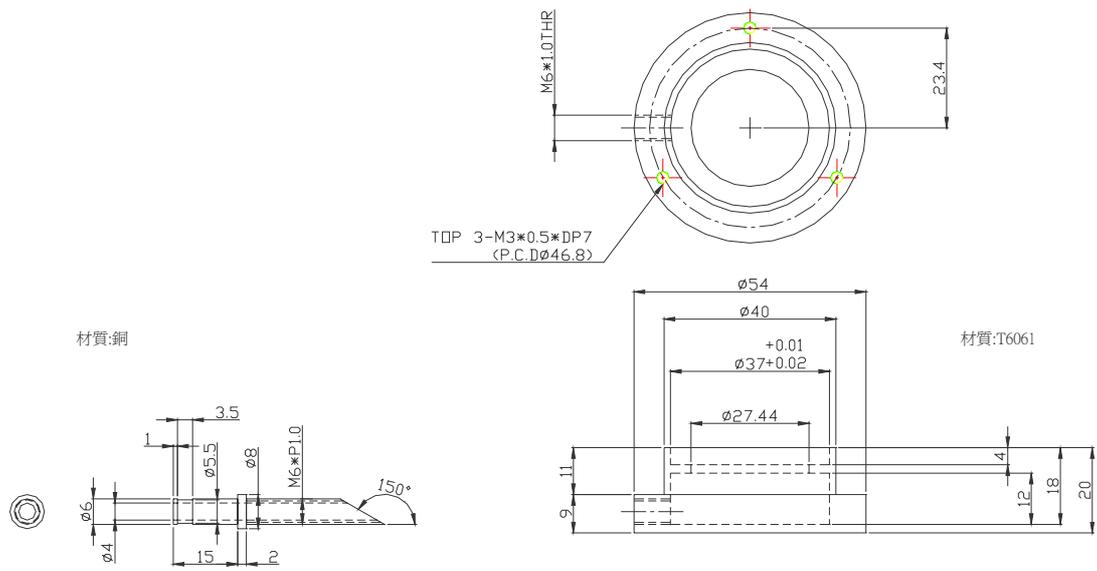


圖 18. 後端濾紙底座。



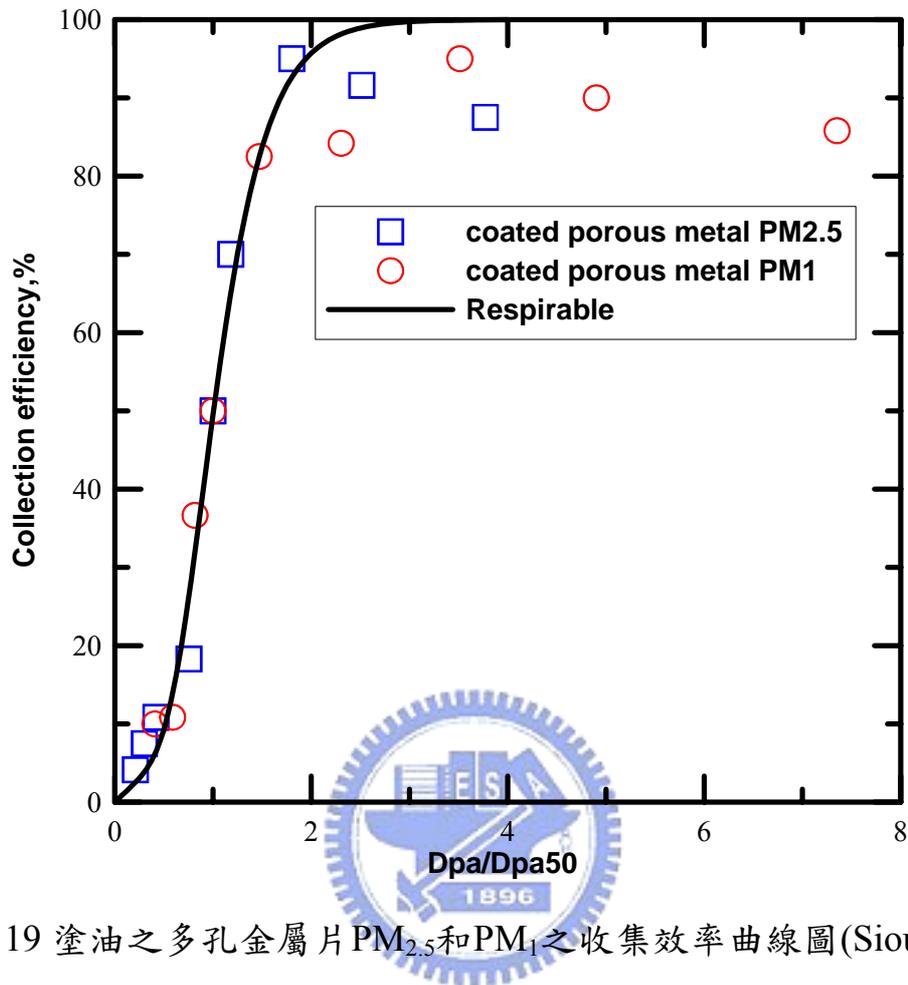


圖 19 塗油之多孔金屬片PM_{2.5}和PM₁之收集效率曲線圖(Sioutas et al.,1999)。流量為 4 LPM，PM_{2.5}的噴嘴大小為 0.26 cm，PM₁的噴嘴大小為 0.14 cm，多孔金屬片 100 μ m，直徑=0.95 cm，厚度=0.16cm。

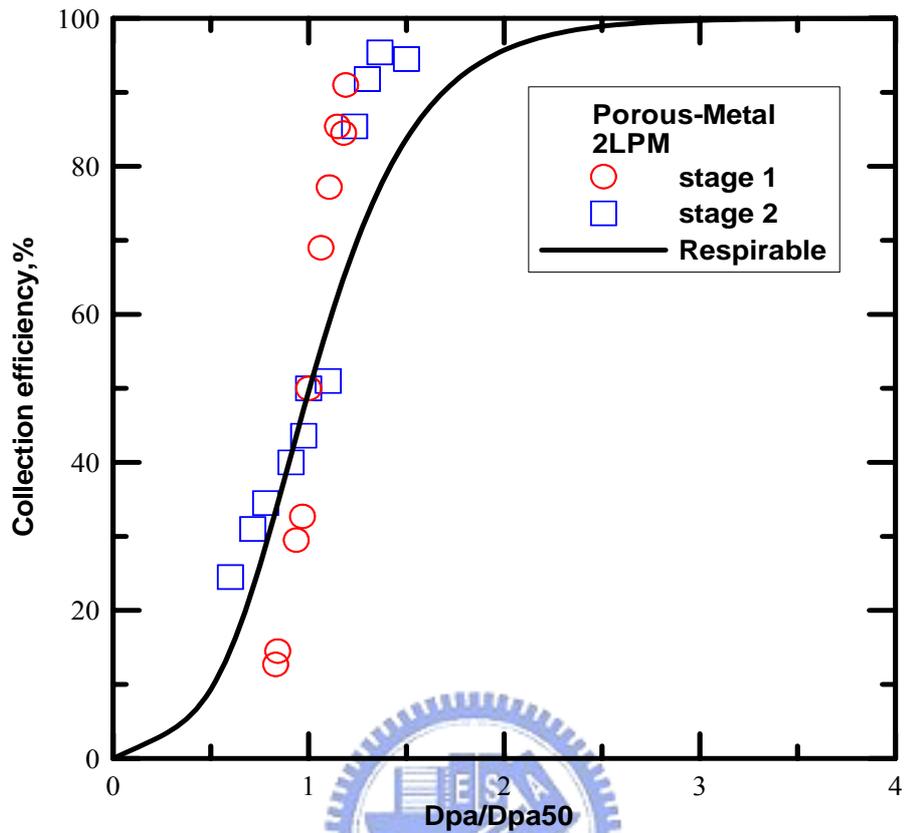
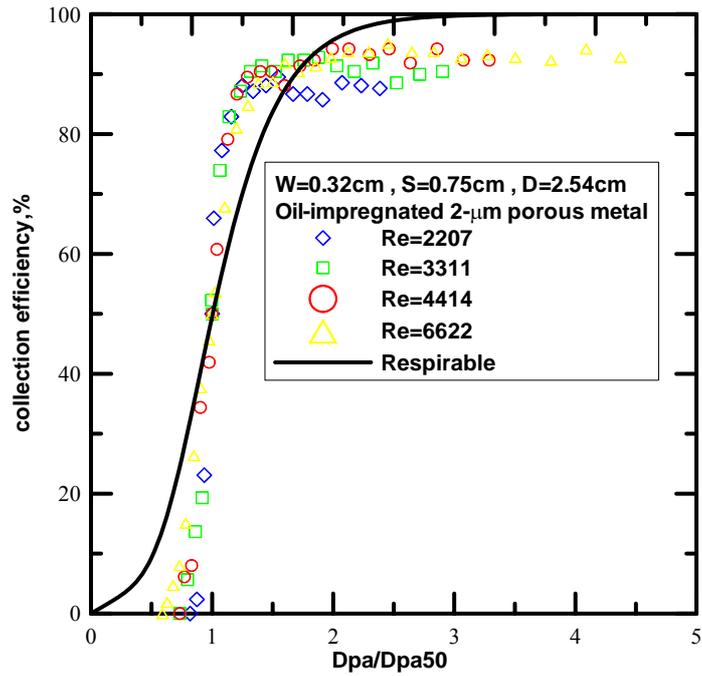
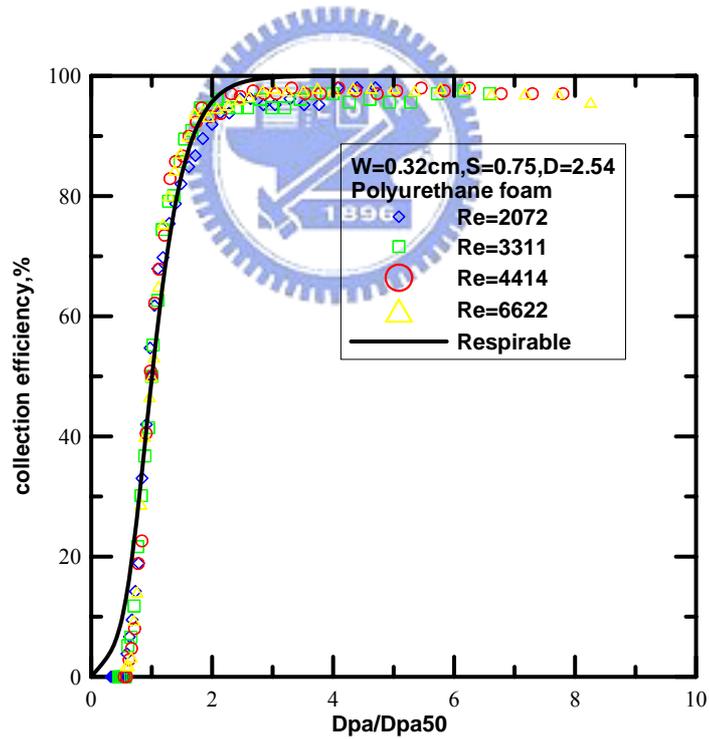


圖 20. 多孔金屬片之收集率曲線圖(蔡等人,2001)。流量=2 LPM，100 μm 之多孔金屬片，直徑=2.54 cm，厚度=0.317 cm，stage1 噴嘴大小=7.2 cm，stage2 噴嘴大小=1.9 cm。



(a)



(b)

圖 21 (a) 塗油之多孔金屬片收集效率曲線圖 (b) 聚酯泡綿之收集效率曲線圖(Koutrakis,2001)。流量=5、7.5、10 和 15 LPM，泡綿密度=30

kg/m^2 ，50 ppi。

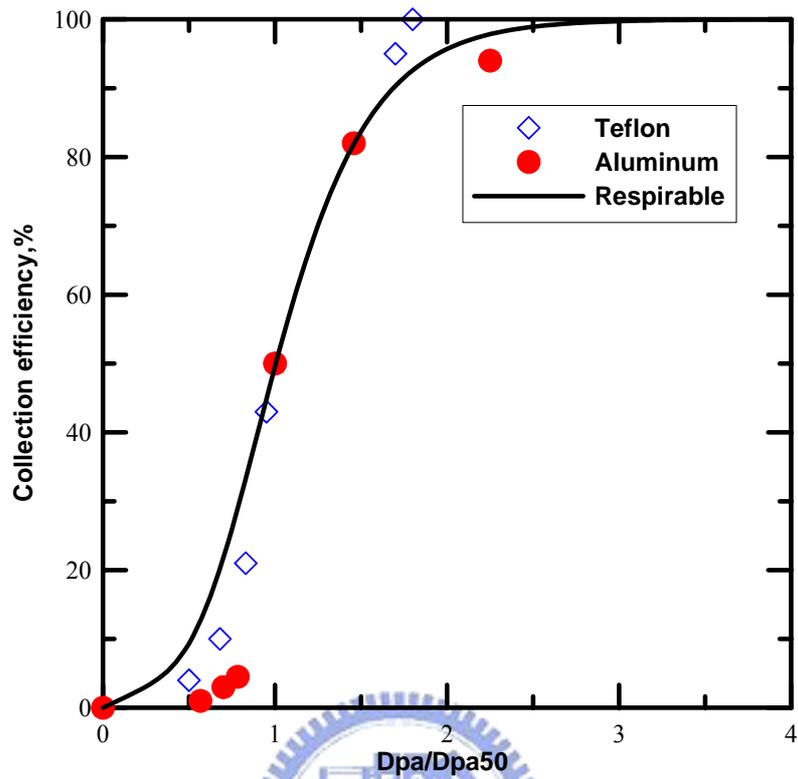


圖 22 鋁箔和 Teflon 之收集效率曲線圖(Sioutas,2002)。流量=9 LPM，
噴嘴大小為 0.05 cm。



圖 23 不同材質的收集板，由左至右依次為泡綿(65 ppi 或 100 ppi)、鋁箔、100 μm 、40 μm 、20 μm 和 5 μm 的多孔金屬片。



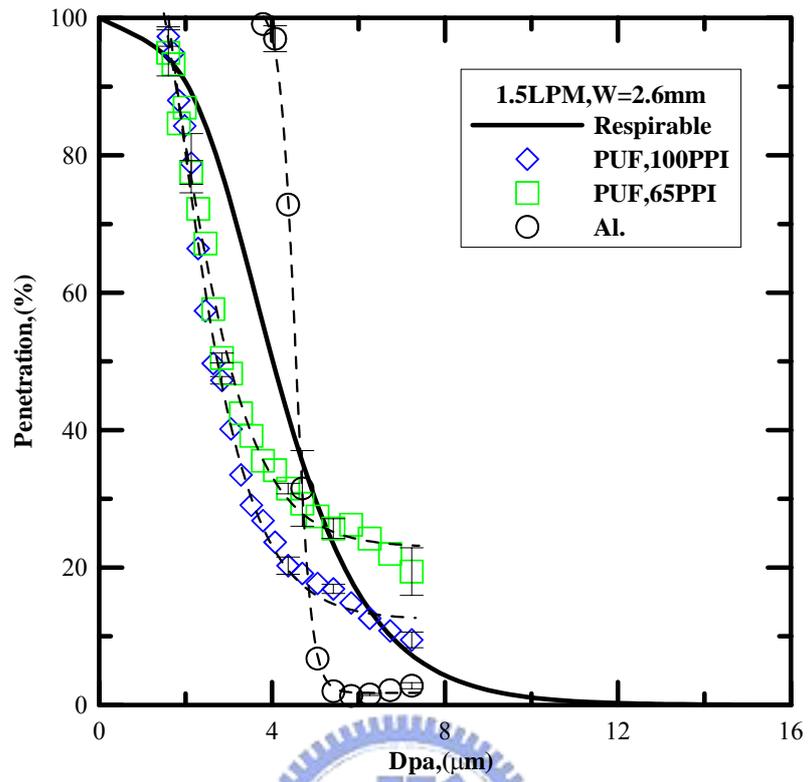


圖 24.泡綿和鋁箔之穿透效率曲線圖，1.5 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

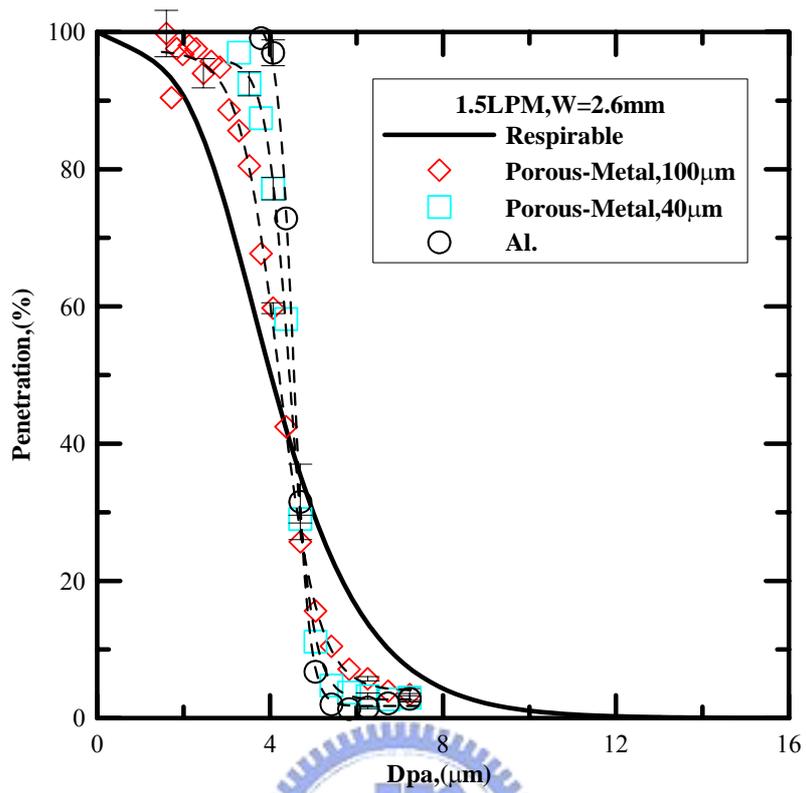


圖 25. 多孔金屬片(孔隙直徑 100 μm 及 40 μm)和鋁箔之穿透效率曲線

圖，1.5 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

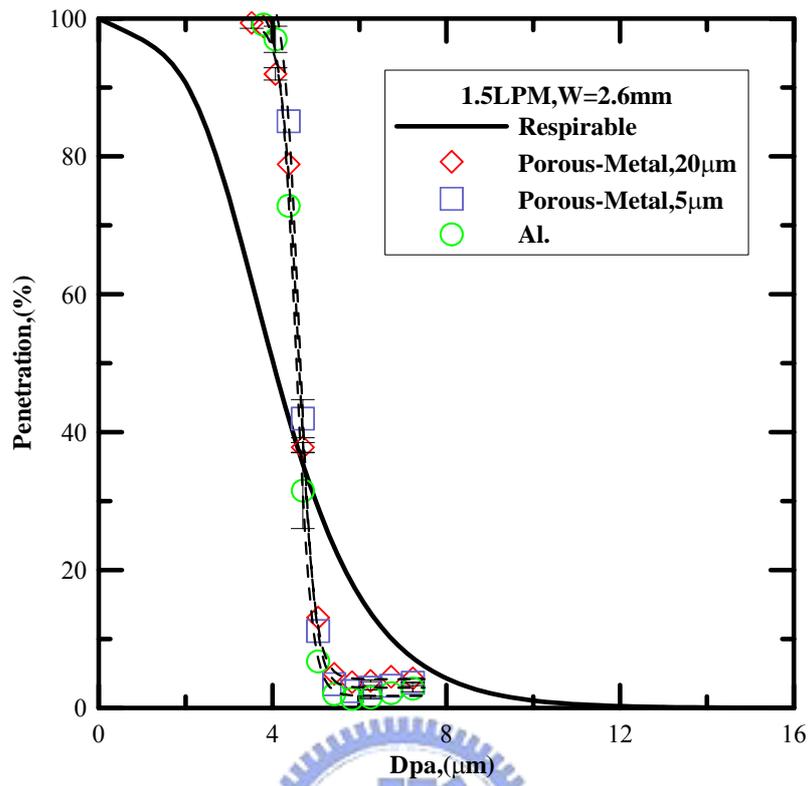


圖 26. 多孔金屬片和鋁箔之穿透效率曲線圖，1.5 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

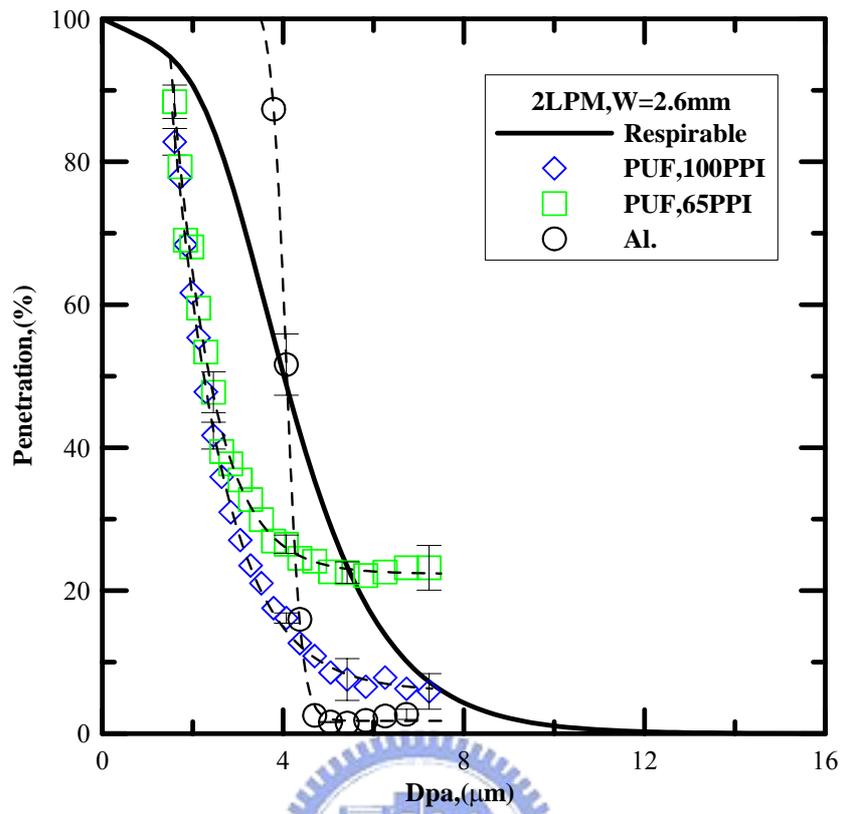


圖 27.泡綿和鋁箔之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

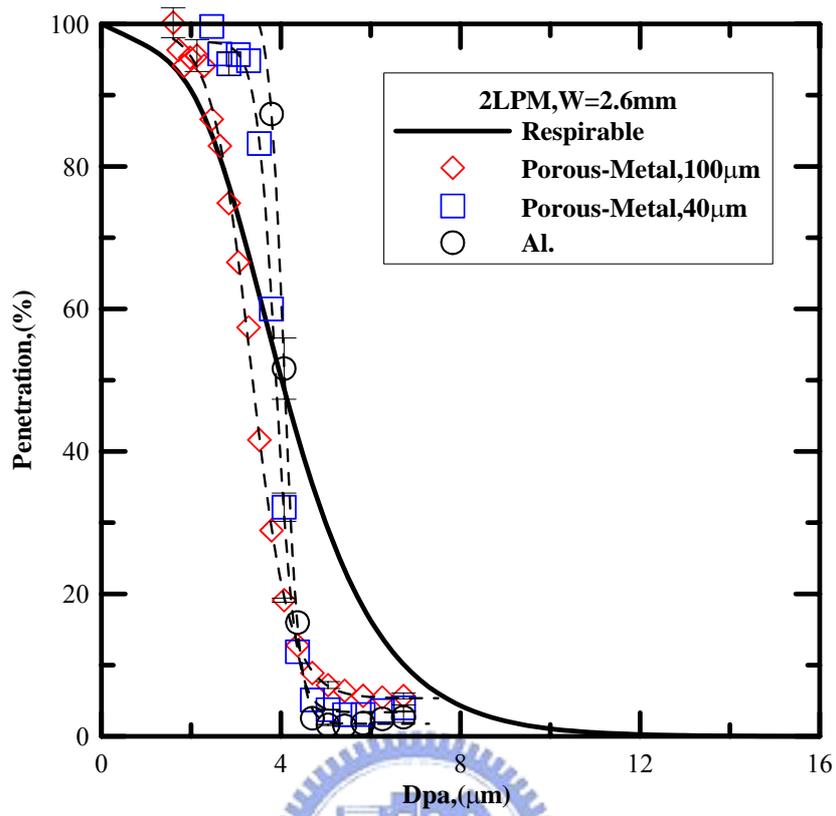


圖 28 多孔金屬片和鋁箔之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

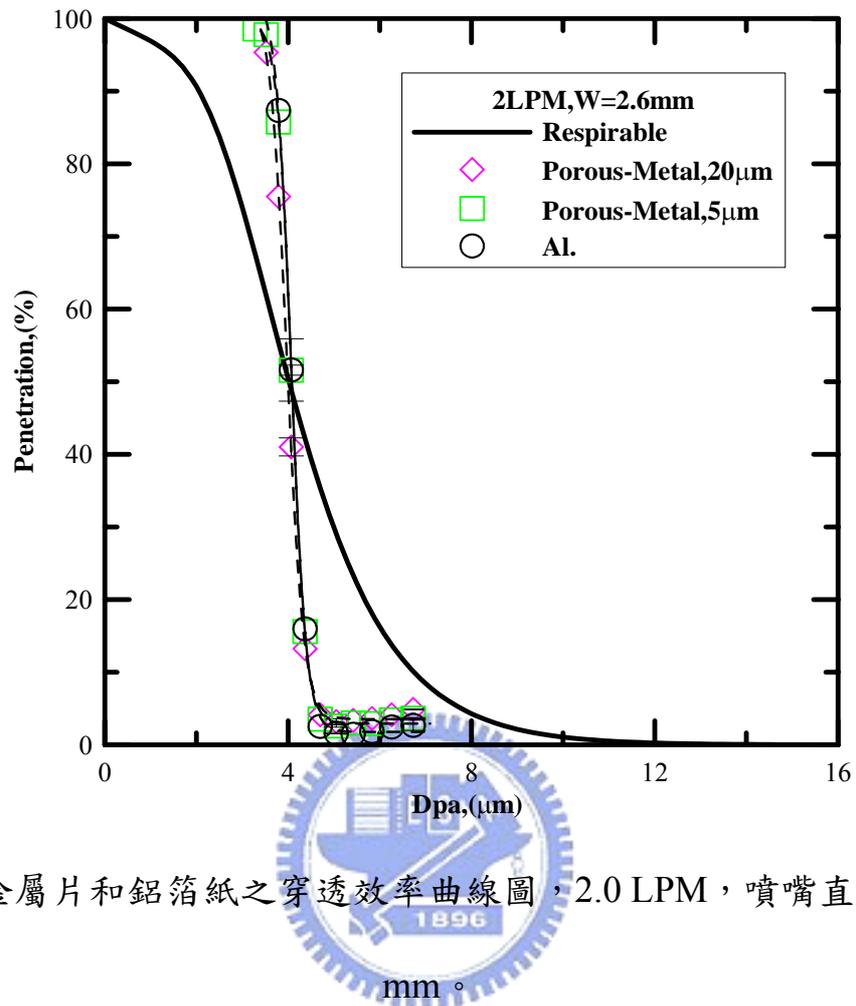


圖 29 金屬片和鋁箔紙之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 2.6 mm。

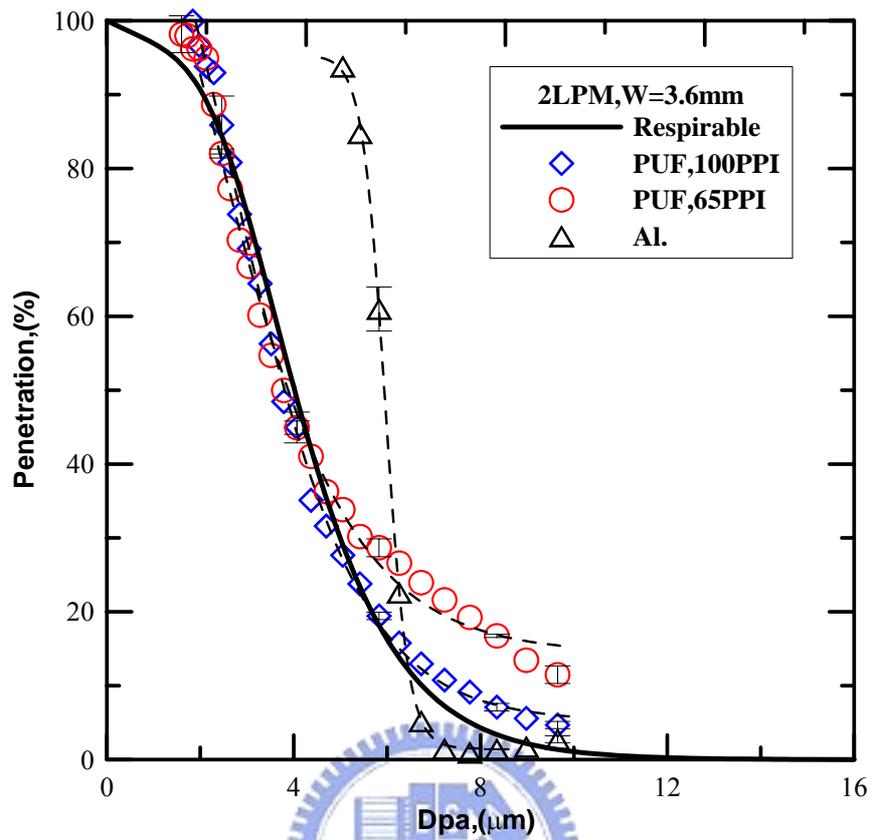


圖 30. 泡綿和鋁箔之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

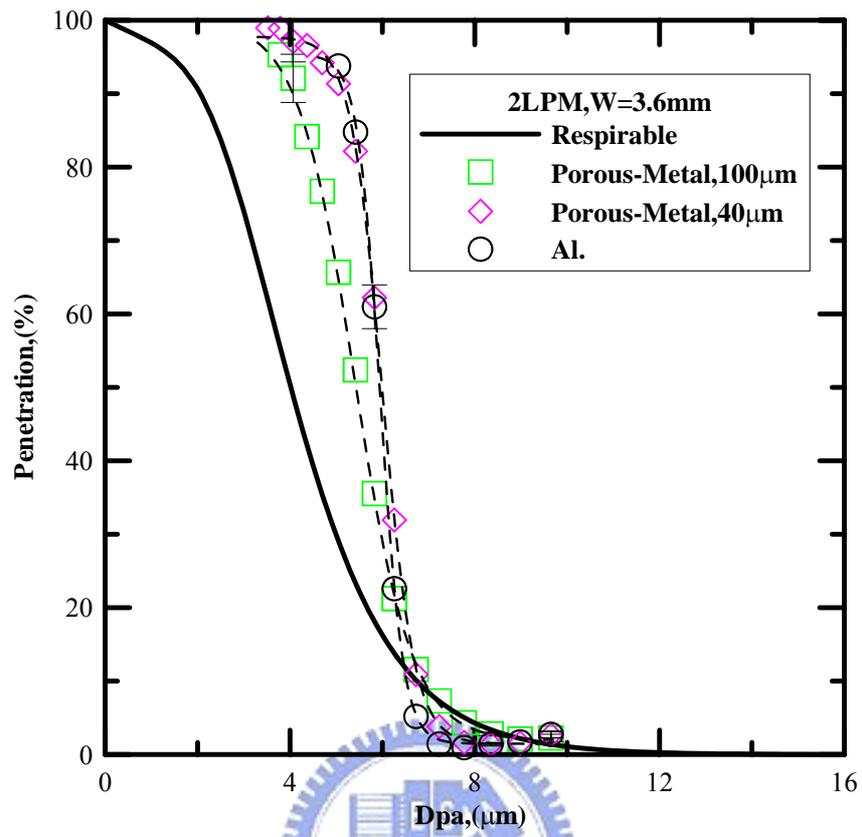


圖 31. 多孔金屬片和鋁箔之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

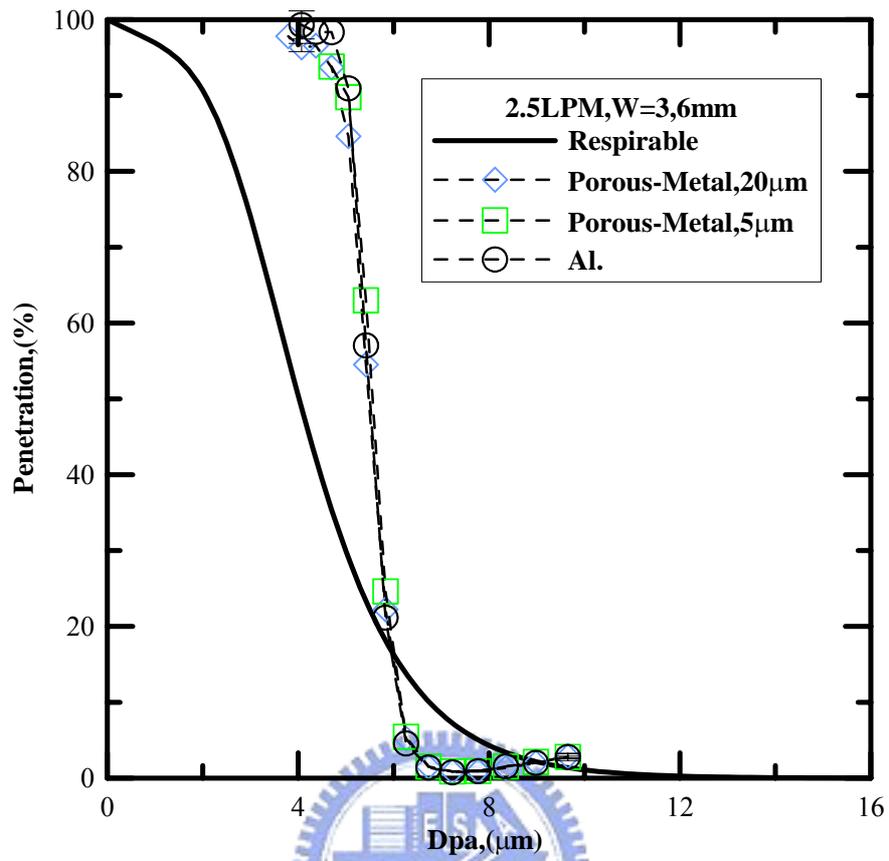


圖 32 多孔金屬片和鋁箔紙之穿透效率曲線圖，2.0 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

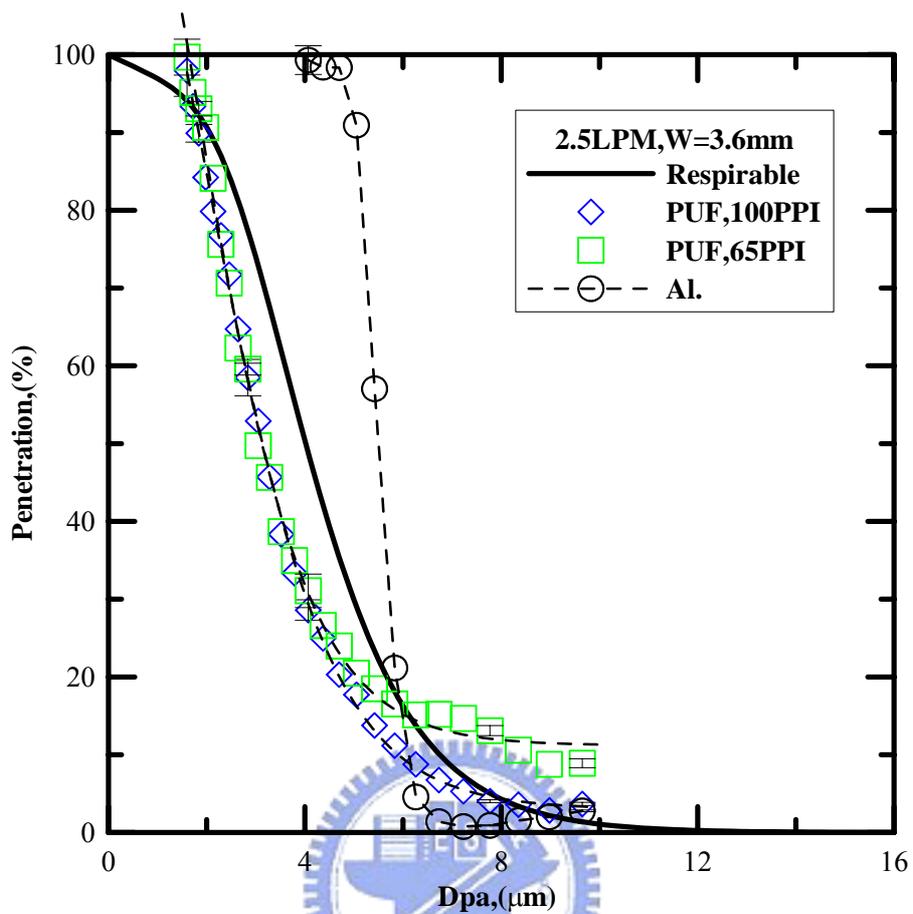


圖 33 泡綿和鋁箔紙之穿透效率曲線圖，2.5 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

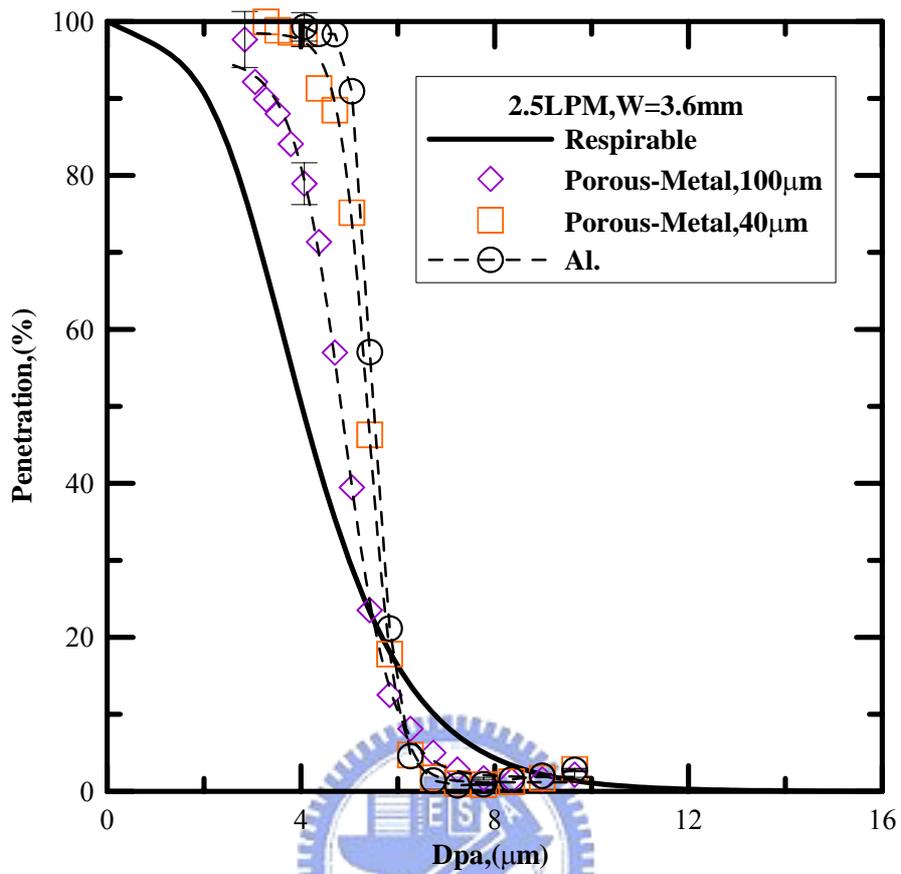


圖 34. 多孔金屬片和鋁箔紙之穿透效率曲線圖，2.5 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

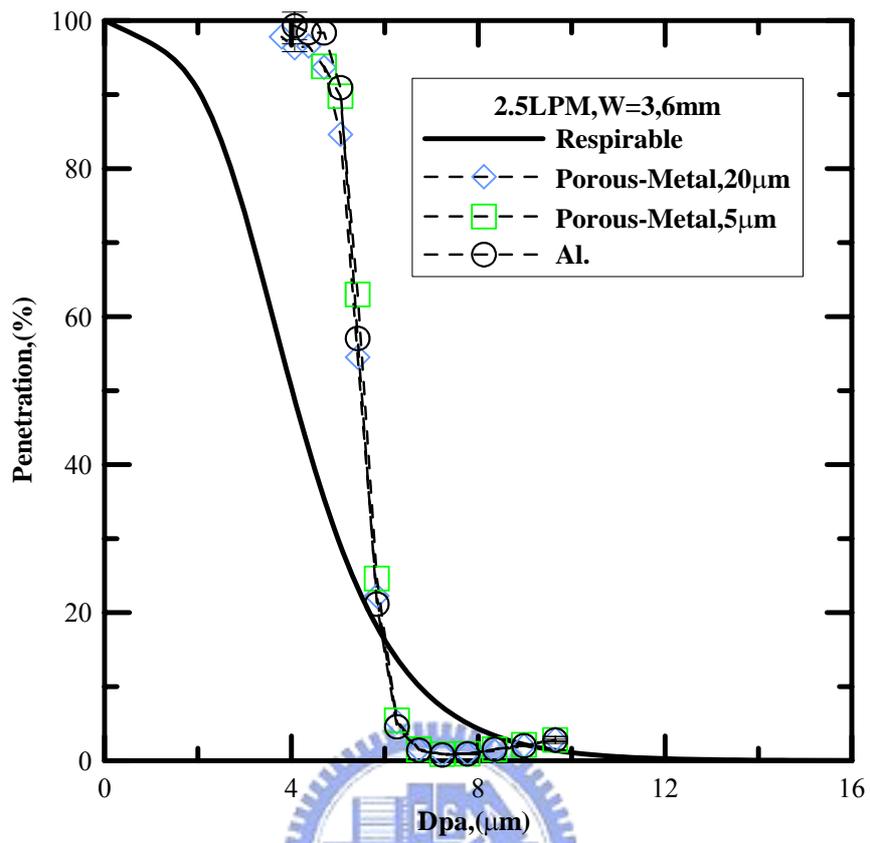


圖 35 多孔金屬片和鋁箔紙之穿透效率曲線圖，2.5 LPM，噴嘴直徑為 3.6 mm。

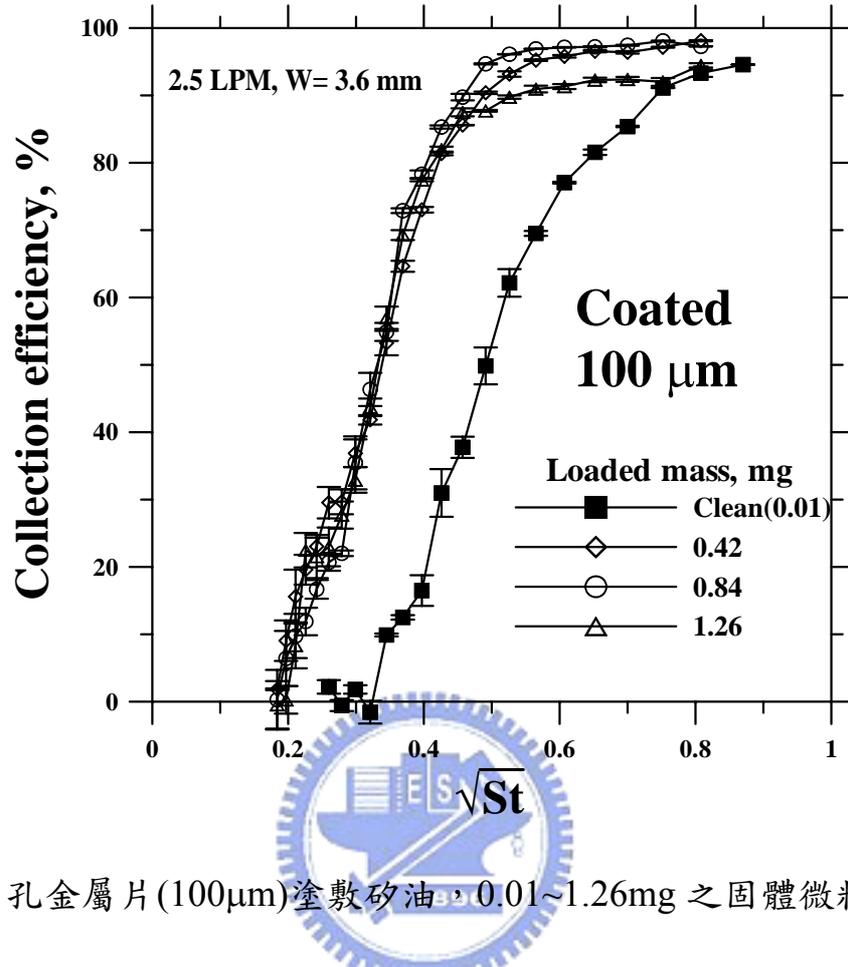


圖 36 多孔金屬片(100 μ m)塗敷矽油，0.01~1.26mg 之固體微粒負載的採樣效率。

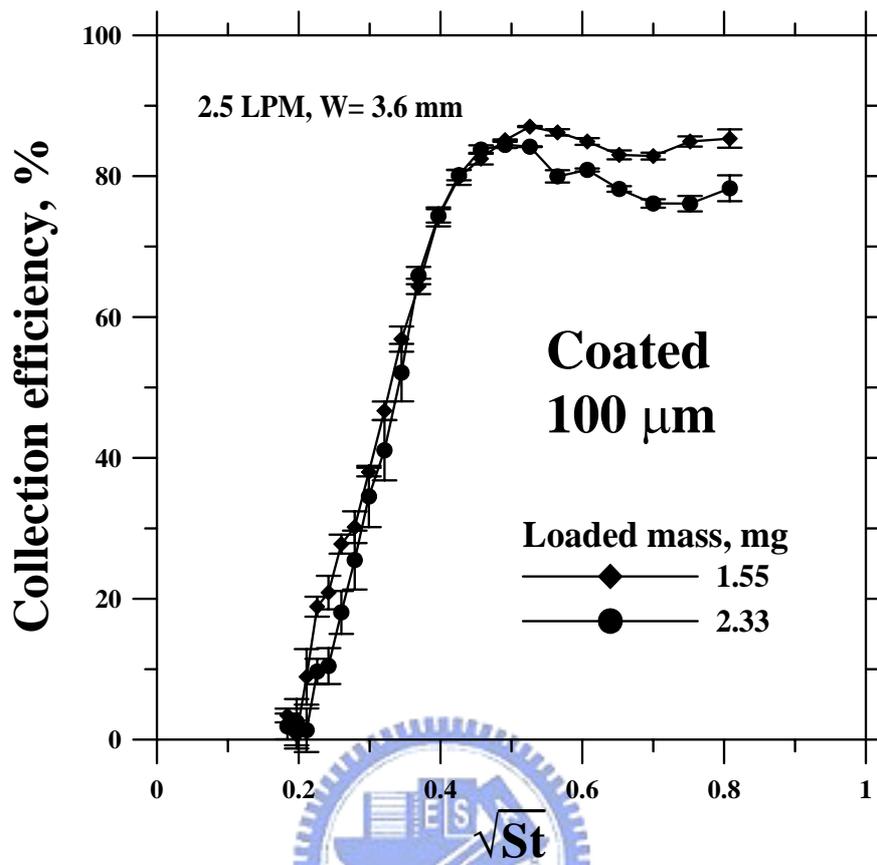


圖 37 多孔金屬片(100 μm)塗敷矽油，1.55~2.33mg 之固體微粒負載的採樣效率。

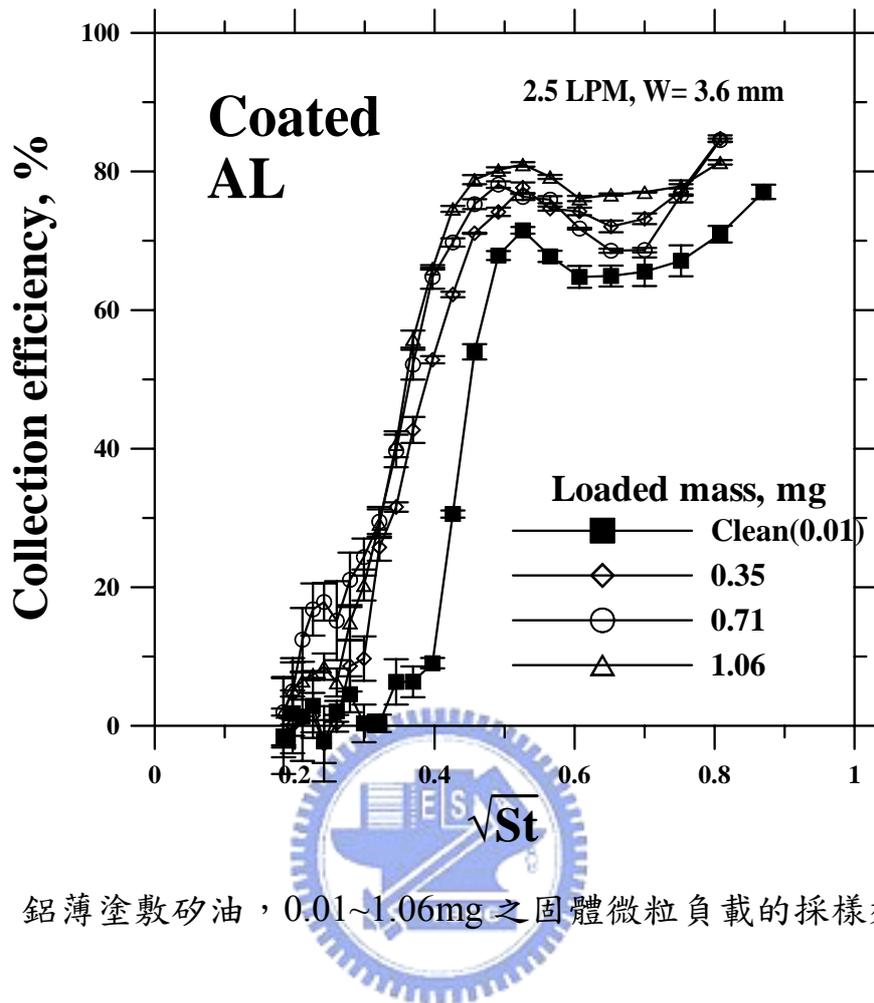


圖 38. 鋁薄塗敷矽油，0.01~1.06mg 之固體微粒負載的採樣效率。

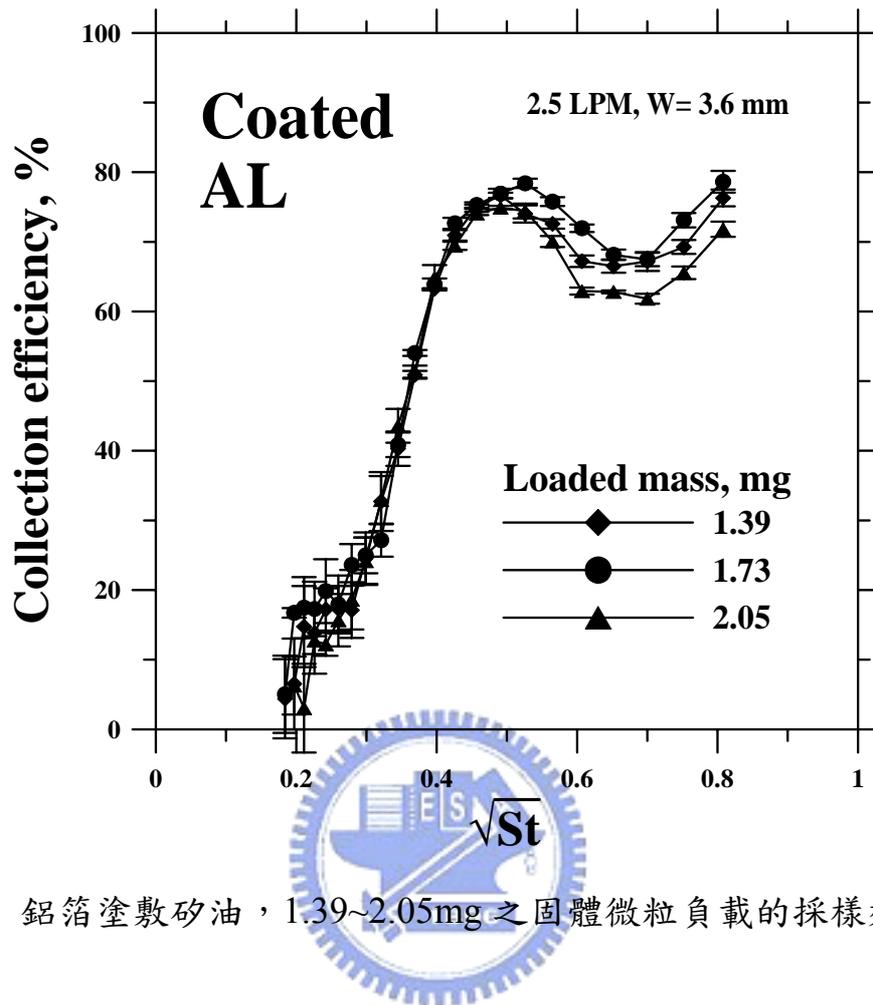


圖 39. 鋁箔塗敷矽油，1.39~2.05mg 之固體微粒負載的採樣效率。

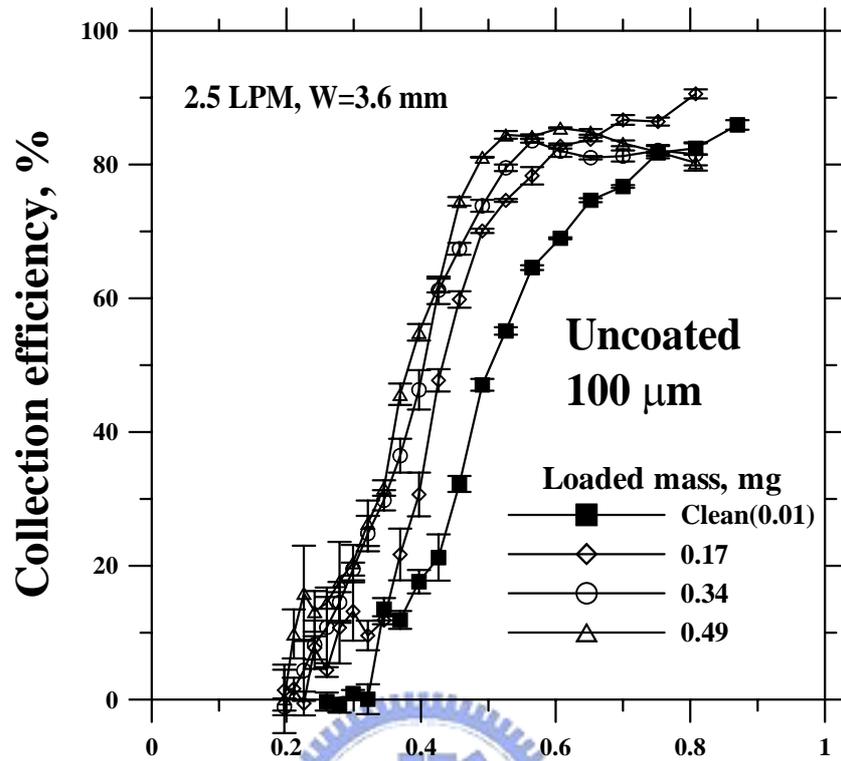


圖 40. 多孔金屬片(100 μm)未塗敷矽油，0.01~0.49mg 之固體微粒負載的採樣效率。

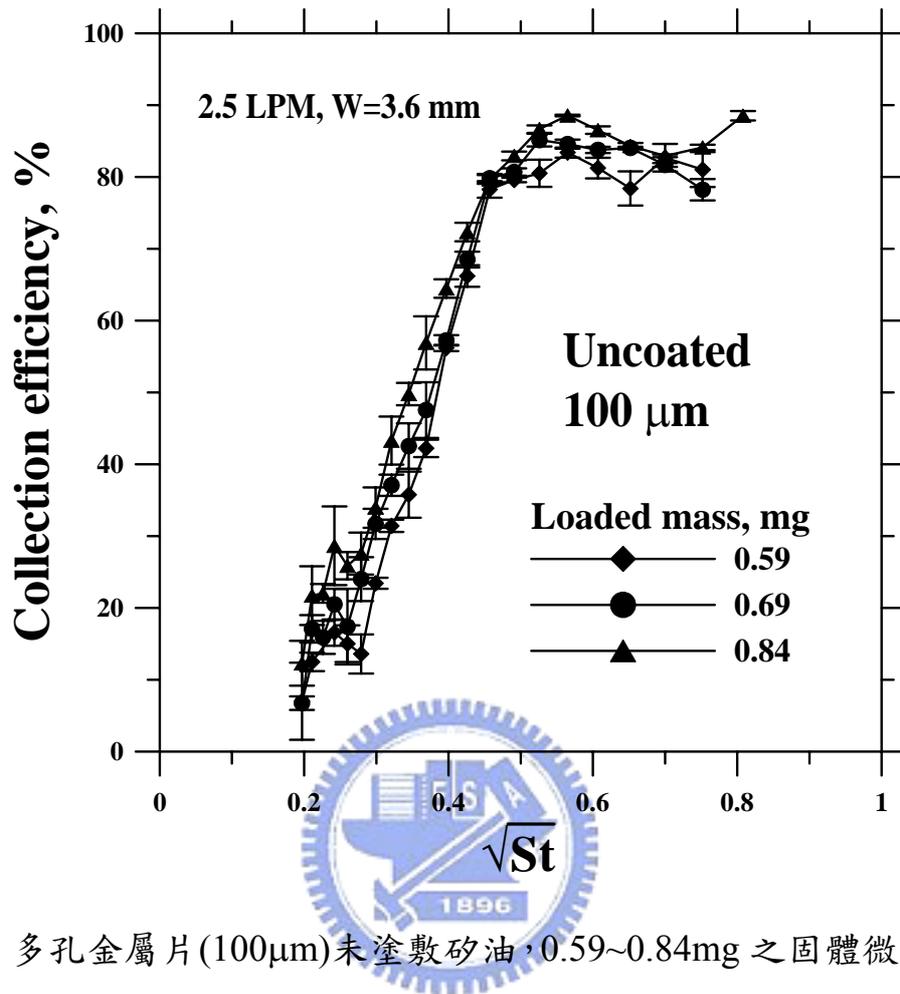


圖 41. 多孔金屬片(100 μm)未塗敷矽油, 0.59~0.84mg 之固體微粒負載的採樣效率。

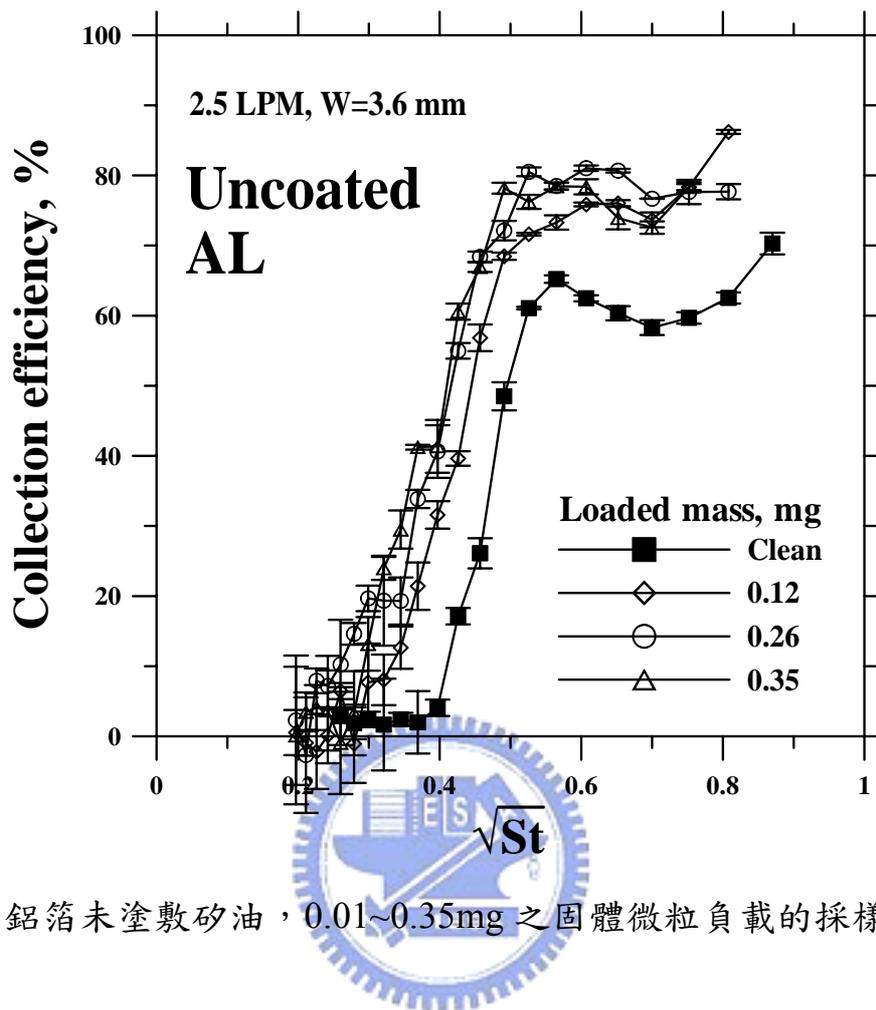


圖 42. 鋁箔未塗敷矽油，0.01~0.35mg 之固體微粒負載的採樣效率。

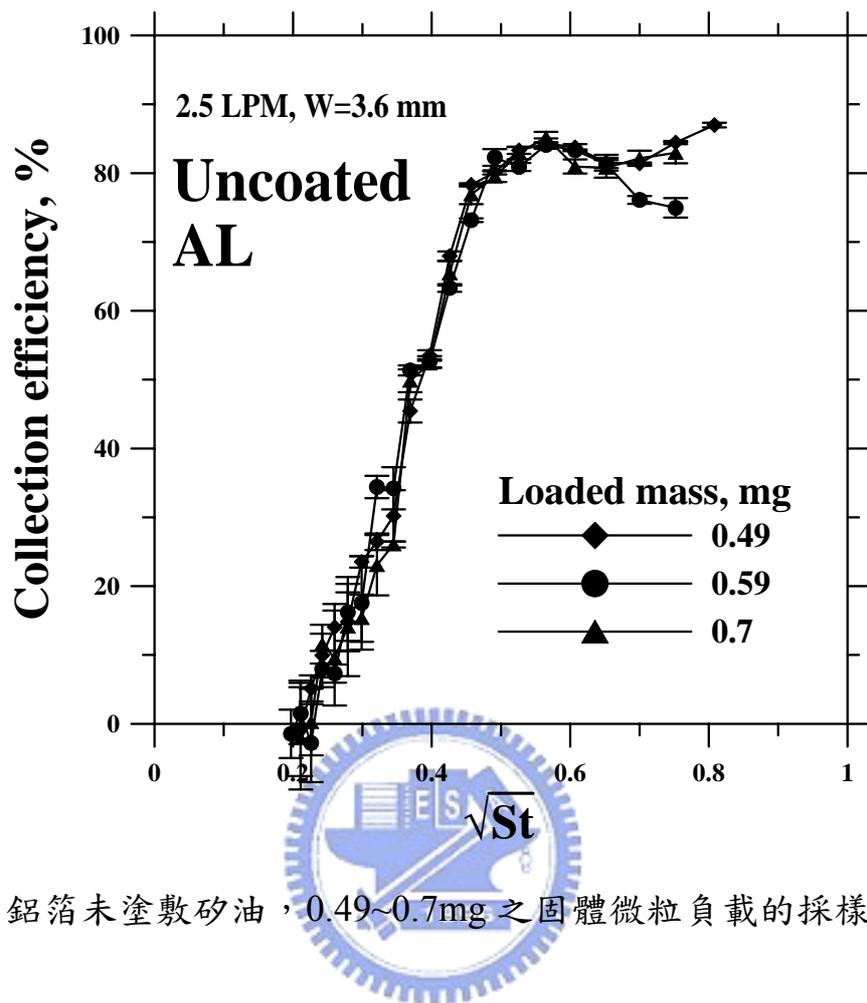


圖 43. 鋁箔未塗敷矽油，0.49~0.7mg 之固體微粒負載的採樣效率。

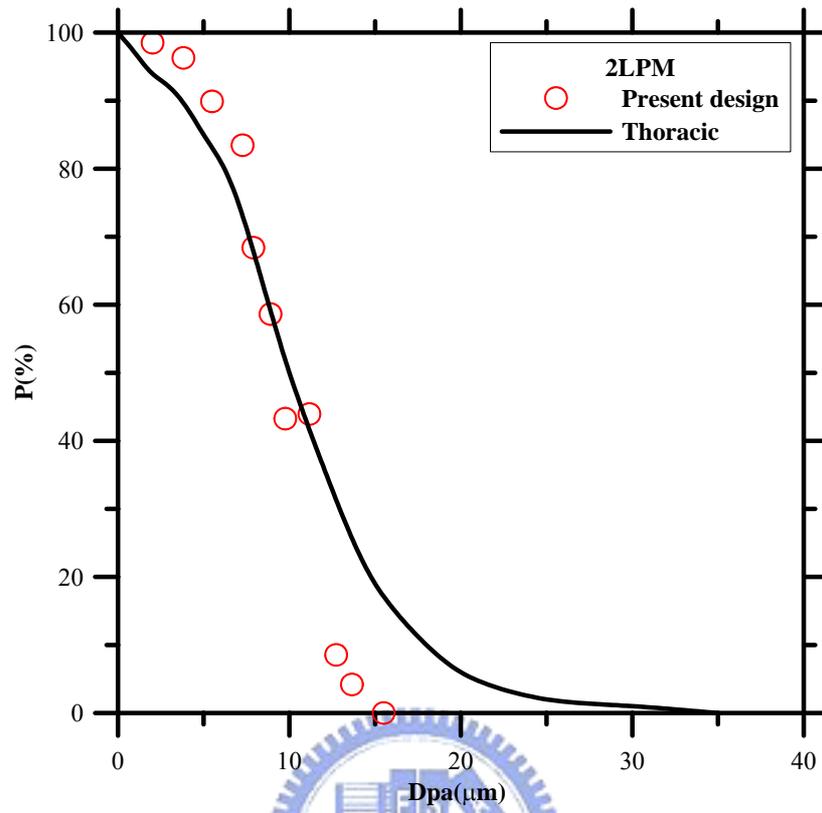


圖 44. 泡棉收集板與胸腔區穿透效率曲線圖。

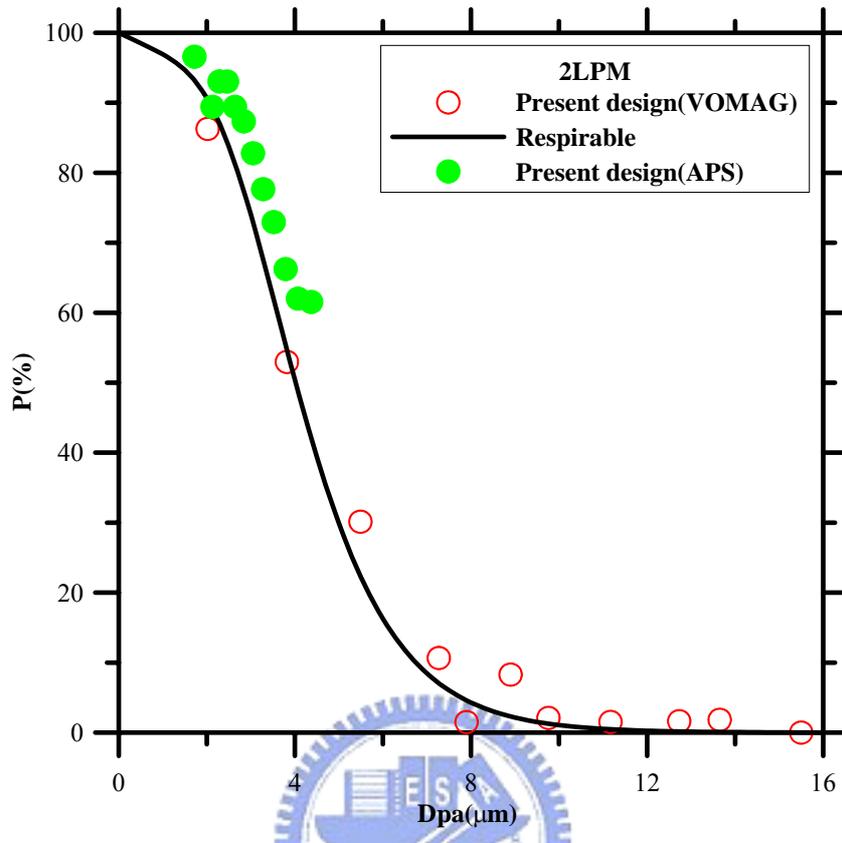


圖 45. 泡棉收集板與可呼吸性穿透效率曲線圖。

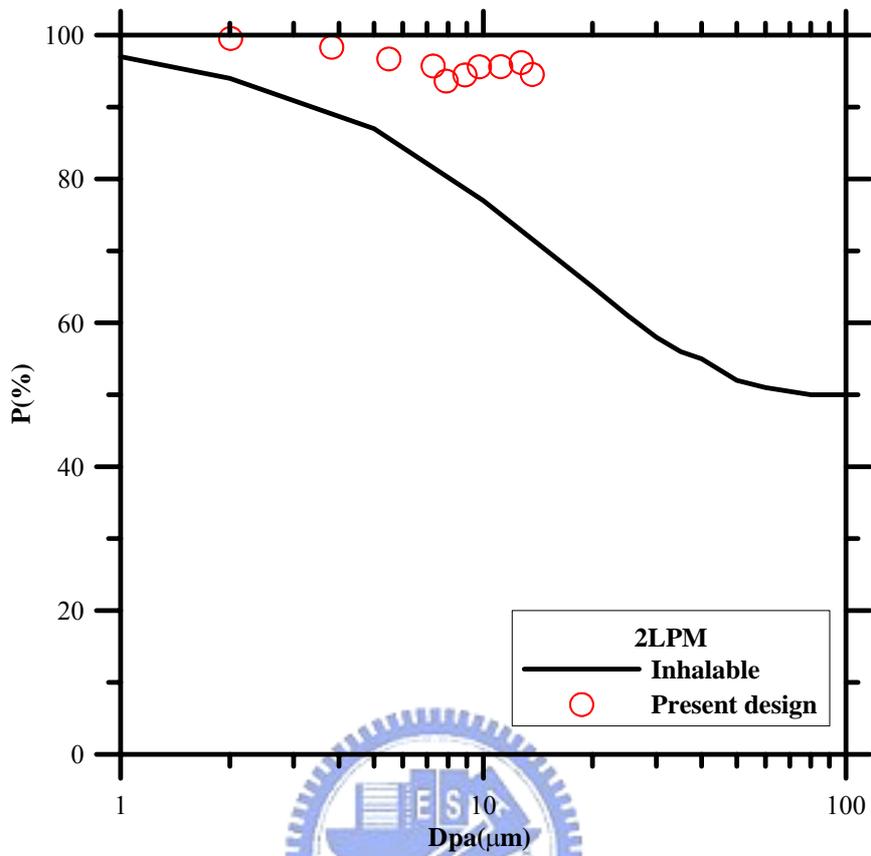


圖 46. Inspirable stage 之穿透效率曲線

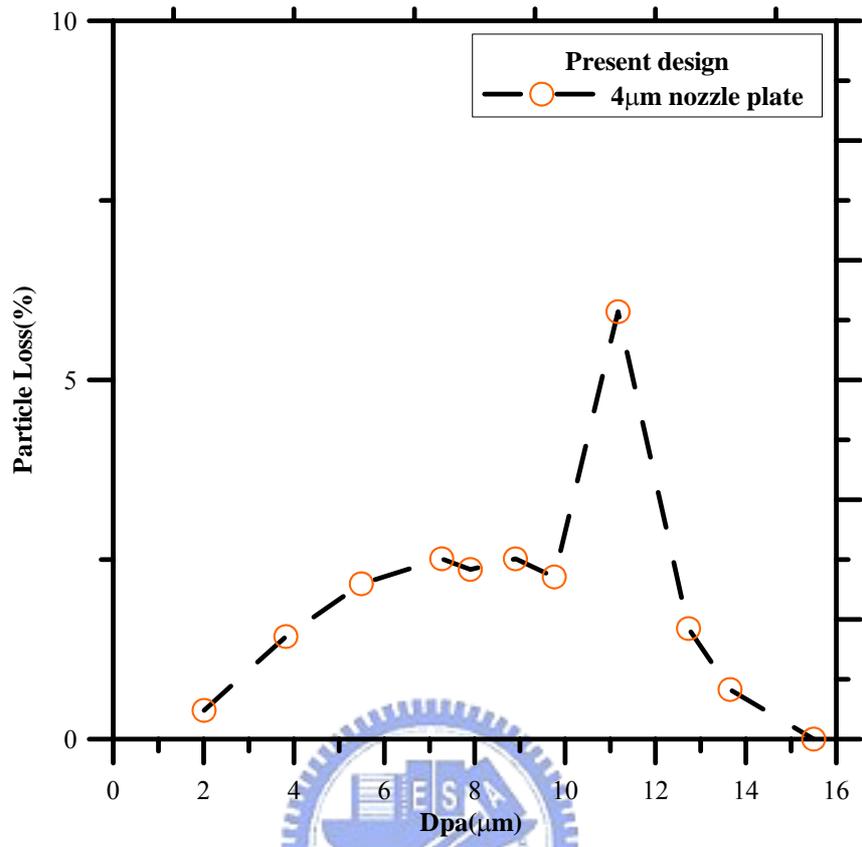


圖 47. 4 μm nozzle plate 之微粒損失率

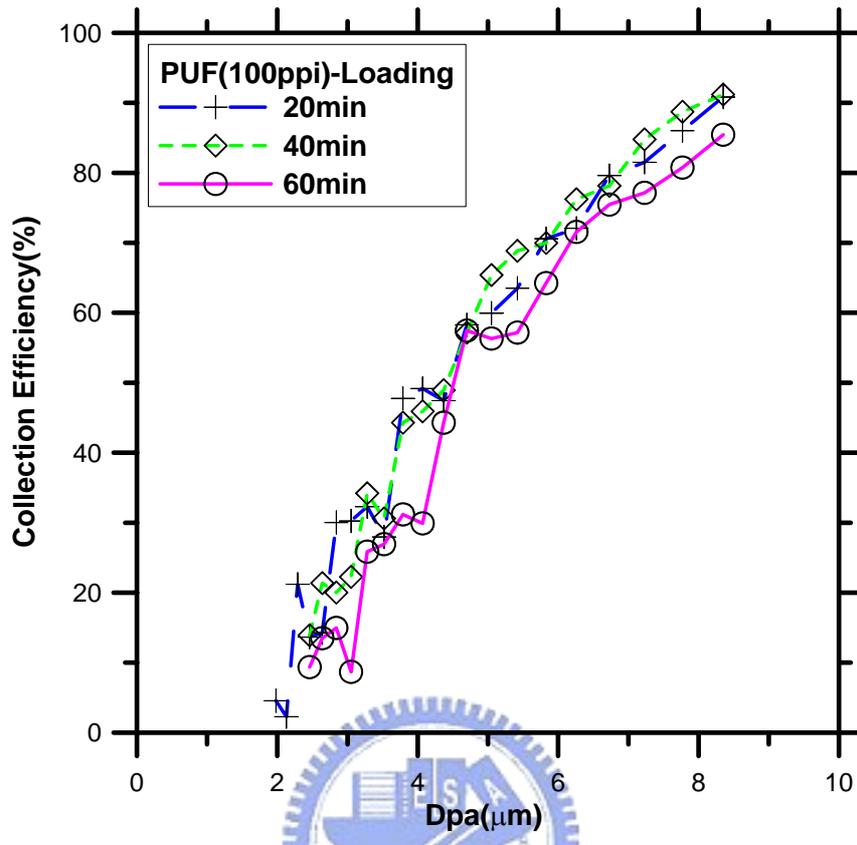


圖 48. 泡綿(100ppi)於 20~60min 之微粒收集效率曲線圖

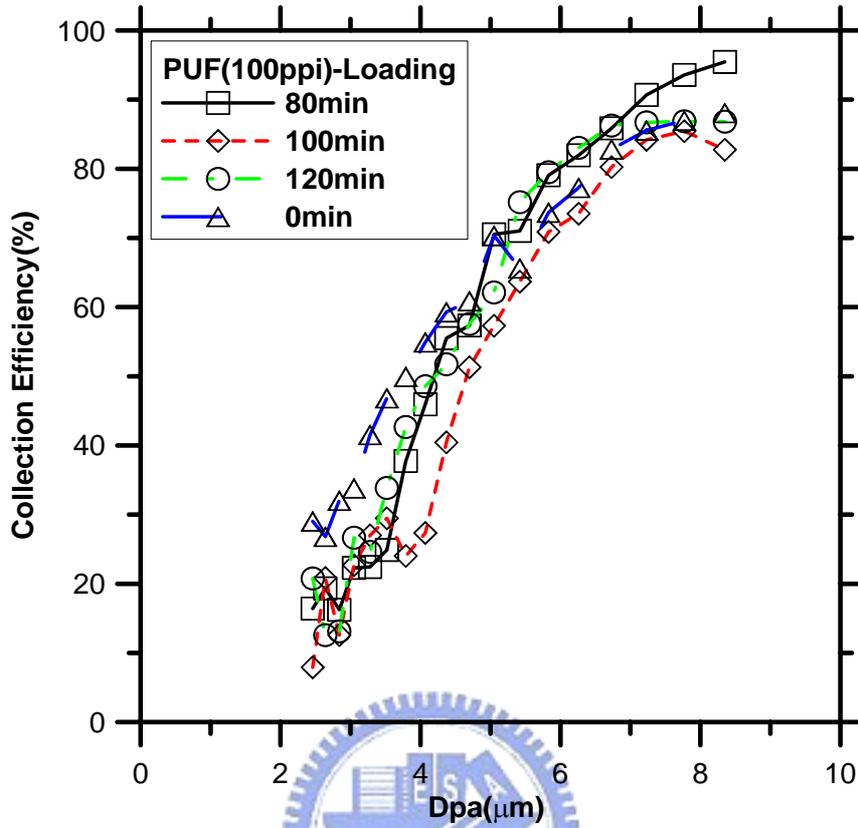


圖 49. 泡棉(100ppi)於 0min 和 80~120min 之微粒收集效率曲線圖